

# RHEINISCHE FACHHOCHSCHULE KÖLN

University of Applied Sciences

Fachbereich: Ingenieurwesen

Studiengang: Automatisierungstechnik (M. Eng.)



## Master Thesis

Entwicklung eines optischen Messsystems für Strahlungs-  
flussdichteverteilung und Verifizierung anhand hochkonzen-  
trierter Solarstrahlung

Vorgelegt von: Martin Thelen

MEG 213 23 23

1. Prüfer: Prof. Dr. Peter Armbrüster

2. Prüfer: Prof. Dr. Marcus Scholl

Sommersemester 2016

# Entwicklung eines optischen Messsystems für Strahlungs- flussdichteverteilung und Verifizierung anhand hochkonzen- trierter Solarstrahlung

Rheinische Fachhochschule Köln (RFH)  
Master Thesis  
Sommersemester 2016

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Institut für Solarforschung  
Abteilung Großanlagen und Solare Materialien

Dipl.-Ing. (FH) Martin Thelen



## Kurzfassung

Um beim DLR-Institut für Solarforschung die Strahlungsleistung (Fluss) und Leistungsdichte (Flussdichte) konzentrierter Solarstrahlung bestimmen zu können, wird seit 1995 das kamerabasierte Messsystem FATMES (Flux and Temperature Measurement System) verwendet. Die Nachteile der geringen Bildauflösung, der umständlichen Bedienung sowie der langsamen Rechnerarchitektur VAX (Virtual Address Extension) erfordern eine Überarbeitung des bestehenden Messsystems, deren Komponenten vermehrt ausfallen. Das im Rahmen dieser Ausarbeitung entwickelte Messsystem FMAS (Flux Mapping Acquisition System) verfügt über Hardware auf dem Stand der Technik und ist wegen der Implementierung mit LabVIEW kompatibel mit Windows-Betriebssystemen. Die Dauer einer Messung wird gegenüber FATMES um den Faktor 10 reduziert. Das neue Messsystem ist nicht mehr an die Großanlagen Sonnenofen und Hochleistungsstrahler des DLR angebunden und ermöglicht dezentrale Messungen. Die Messdaten sind transportabel und die Algorithmen zur digitalen Bildverarbeitung durchgehend transparent. Die Messungenauigkeit von FMAS wird nach den bisherigen Erkenntnissen mit maximal  $\pm 3 \%$  angegeben. Die Messabweichungen von FATMES liegen nach den durchgeführten Vergleichsmessungen mindestens 2 % darüber.

## Abstract

To identify the power and flux density of concentrated solar radiation the Institute of Solar Research at the German Aerospace Center (DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) has used the camera-based measurement system FATMES (Flux and Temperature Measurement System) since 1995. The disadvantages of low resolution, difficult handling and slow hardware (VAX – Virtual Address Extension) require a revision of the existing measurement system, whose components commonly fail. The measurement system FMAS, which was developed during this elaboration, has state-of-the-art-hardware available and is compatible with computers based on Windows due to the implementation with LabVIEW. The expenditure of time for a measurement is reduced by the factor 10 compared to FATMES. The new measurement system is no longer associated with the facilities Solar Furnace and High Flux Solar Simulator at the DLR but enables decentralized measurements. The data is mobile and all algorithms of digital image processing are continuously transparent. The measuring inaccuracy of FMAS is specified to at most  $\pm 3 \%$  until now. The error of measurement of FATMES is at least 2 % higher according to the conducted comparison tests.

## Danksagung

Meinem Erstprüfer Prof. Dr. Armbrüster möchte ich einleitend für die lehrreiche Vorlesung „Digitale Bildverarbeitung und maschinelles Sehen“ an der RFH Köln danken, die mich zur Bearbeitung dieses Themengebietes motiviert hat. Außerdem halfen mir die vorbereitenden Gespräche und seine Unterlagen bei der Konzepterstellung für meine vorliegende Master Thesis.

Bei der Anfertigung dieser Arbeit haben mich ebenso meine Kollegen der Abteilung Großanlagen und Solare Materialien (Sonnenofen und Hochleistungsstrahler) des DLR-Instituts für Solarforschung unterstützt und bestärkt.

Für seine zahlreichen Hinweise und Erläuterungen zu den Themengebieten Optik, physikalische Hintergründe und mathematische Beschreibungsformen möchte ich Herrn Dr. rer. nat. Christian Raeder meinen Dank aussprechen.

Meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Gerd Dibowski danke ich für die Bereitstellung der Großanlagen Sonnenofen und Hochleistungsstrahler, seine hilfreiche Tätigkeit als Lektor und seine stete Zuverlässigkeit.

Ebenso unverzichtbar für meine Tätigkeiten im Rahmen der vorliegenden Master Thesis war mein Kollege und Betriebsleiter der Großanlagen Dipl.-Ing. (FH) Christian Willsch. Der Verfechter des alten Messsystems FATMES führte mich in alle praktischen Belange der Strahlungsflussdichtemessung ein und legte somit den Grundstein für die Neuentwicklung des Messsystems FMAS.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>i</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>ii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
<b>1     <b>Einleitung.....</b></b>	<b>1</b>
1.1     Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage .....	1
1.2     Vorgehensweise .....	1
<b>2     <b>Grundlagen .....</b></b>	<b>3</b>
2.1     Kenngrößen optischer Strahlung .....	3
2.2     CSP am DLR-Institut für Solarforschung .....	4
2.2.1     Sonnenofen.....	5
2.2.2     Hochleistungsstrahler.....	8
2.2.3     Solarturm Jülich .....	10
2.2.4     Messsystem FATMES.....	12
<b>3     <b>Optische Strahlungsmessung .....</b></b>	<b>14</b>
3.1     Lambertsche Oberflächen .....	14
3.2     Aufnahmesysteme.....	15
3.2.1     CCD-Digitalkameras.....	15
3.2.2     Objektive und Blenden .....	16
3.2.3     Verschlusszeit und Neutraldichtefilter.....	18
3.3     Bildverarbeitung .....	19
3.3.1     Grauwertbilder.....	19
3.3.2     Dunkelstromkompensation .....	19
3.3.3     Shadingkorrektur.....	20
3.3.4     Kontrastverbesserung .....	21
3.3.5     Bildentzerrung .....	22
3.4     Sensorik zur Kalibrierung.....	24
3.4.1     Radiometrie.....	25
3.4.2     Kalorimetrie .....	27

<b>4</b>	<b>Entwicklung des Messsystems FMAS .....</b>	<b>30</b>
4.1	Anforderungen.....	30
4.2	Hardware.....	31
4.2.1	Kamera und Zubehör .....	31
4.2.2	Filterrad.....	35
4.3	Software .....	37
4.3.1	National Instruments LabVIEW.....	37
4.3.2	Benutzeroberfläche von FMAS.....	40
4.3.3	Softwarearchitektur .....	45
4.3.4	Programmablauf und Funktionalität.....	48
4.3.5	Flussdichtemessung mit FMAS .....	55
4.3.5.1	Messung mit Referenz-Radiometer (Online-Messung).....	55
4.3.5.2	Auswertung bestehender Rohbilder .....	57
4.3.5.3	Messung ohne Referenz-Radiometer (Offline-Messung).....	57
4.3.6	Filterradsteuerung .....	58
4.3.7	Bildkorrektur und Leistungsberechnung .....	60
4.3.8	Messdaten .....	66
4.4	Verifizierung .....	67
4.4.1	Flussdichtemessung im Sonnenofen.....	68
4.4.2	Vergleich der Messsysteme FATMES und FMAS .....	69
4.4.3	Flussdichtemessung im Hochleistungsstrahler .....	75
4.5	Leistungsbestimmung einer UV-Lampe .....	78
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>80</b>
	<b>Anhang A1 (Kamera).....</b>	<b>83</b>
	<b>Anhang A2 (Objektiv SOF).....</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang A3 (Objektiv HLS).....</b>	<b>86</b>
	<b>Anhang A4 (Motortreiber Filterrad).....</b>	<b>87</b>
	<b>Anhang A5 (Schrittmotor Filterrad).....</b>	<b>88</b>
	<b>Anhang A6 (FMAS-Messung Schritt für Schritt) .....</b>	<b>89</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>94</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>96</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>97</b>
	<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>99</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>100</b>

## Abkürzungsverzeichnis

CCD	charge coupled device
CoG	Center of Gravity (Schwerpunkt der Flussdichteverteilung)
CSV	comma seperated values (Dateiformat)
DFR	Doppelfilterrad
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DNI	Direct Normal Irradiation (solare Direktstrahlung)
EFR	Einfachfilterrad
exe	Executable (ausführbare Datei)
FATMES	Flux and Temperature Measurement System
FMAS	Flux Mapping Acquisition System
fps	frames per second
GUI	Graphical User Interface
HLS	DLR – Hochleistungsstrahler
LGS	lineares Gleichungssystem
PV	Photovoltaik
RAM	Random Access Memory (Arbeitsspeicher)
RFH	Rheinische Fachhochschule Köln
ROI	Region of Interest
SOF	DLR – Sonnenofen
STJ	Solarthermisches Kraftwerk / Solarturm Jülich
TC	Thermocouple (Thermoelement)
VAX	Virtual Address Extension (Rechnerarchitektur)





# 1 Einleitung

Die folgenden Kapitel dienen der Erläuterung des Themas dieser Master Thesis und der Darstellung aller Arbeitspakete, die zur Erfüllung der Aufgabenstellung erforderlich sind.

## 1.1 Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage

Sowohl an den Großanlagen Sonnenofen (SOF) und Hochleistungsstrahler (HLS) am DLR-Standort Köln als auch am Solarturm in Jülich ist bei allen Experimenten die Kenntnis der Leistungsdichte in  $\text{W/m}^2$  (Flussdichte) der konzentrierten Solarstrahlung und dessen Verteilung von großer Bedeutung. Das DLR in Köln verfügt über ein veraltetes Messsystem zur Bestimmung der Flussdichteverteilung (FATMES – Flux and Temperature Measurement System). Die maximale Lebensdauer vieler Hardwarekomponenten dieses Systems ist erreicht. Auch die Bedienersoftware ist in sich geschlossen und erschwert Anpassungen. Die zur Bildmessung verwendeten Algorithmen sind darüber hinaus intransparent.

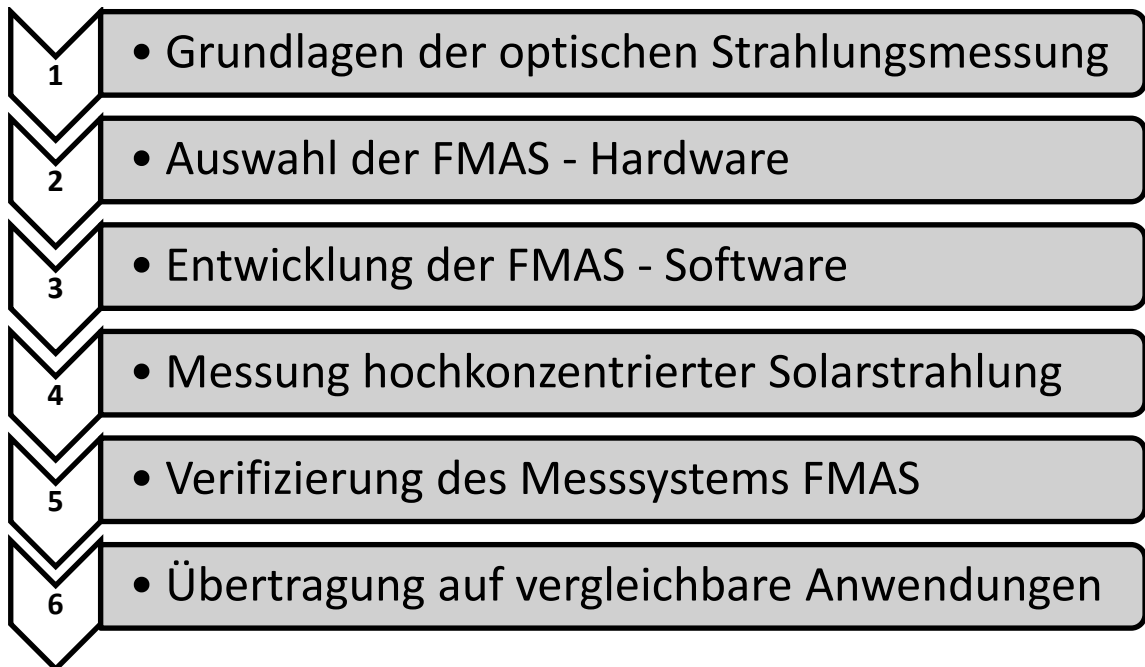
Mit den heutigen Erkenntnissen aus der digitalen Bildverarbeitung und leistungsfähiger Hardware auf dem Stand der Technik soll deshalb ein komplett neues und verbessertes Messsystem (FMAS – Flux Mapping Acquisition System) entwickelt werden, bei dem alle Bestandteile der Bildmessung wie die Bildverzerrung hinterfragt, gegebenenfalls neu ausgelegt und schließlich programmiert werden. Die im Rahmen der Master Thesis entwickelte Software soll zusammen mit der Auswahl geeigneter Kameras, Objektive und Filterkombinationen zukünftig die Flussdichtemessung transparenter und bedienerfreundlicher machen. Ziel ist die Entwicklung eines portablen Messsystems, welches dem Anwender eine schnelle und unkomplizierte Bestimmung der Strahlungsleistungsdichte ermöglicht.

Die Verifizierung anhand hochkonzentrierter Solarstrahlung soll zudem die Übertragung auf weitere Problemstellungen ermöglichen. Ob moderne Raumbelichtung oder Automobilscheinwerfer – das Messsystem soll in der Lage sein, die Strahlungsleistung und -verteilung im (von der jeweiligen Kamera) sichtbaren Wellenlängenbereich auszuwerten.

## 1.2 Vorgehensweise

In der vorliegenden Master Thesis werden zu Beginn die Grundlagen der optischen Strahlungsmessung anhand physikalischer und messtechnischer Hintergründe behandelt. Ebenso werden in diesem ersten Teil Aufbau und Funktion der beim DLR vorhandenen Großanlagen zur Erzeugung hochkonzentrierter Solarstrahlung erläutert, mit deren Hilfe die neue Messeinrichtung getestet wird. Die darauf aufbauende Entwicklung des Messsystems FMAS beinhaltet die Auswahl geeigneter Hardware sowie die

Programmierung der Anwendersoftware, welche den Kern dieser Arbeit bildet. Die an Sonnenofen und Hochleistungsstrahler generierten Messergebnisse des neuen FMAS werden mit dem bestehenden FATMES sowie berechneten Werten verglichen. Abbildung 1 verdeutlicht die einzelnen Arbeitspakete und deren Bearbeitungsreihenfolge anhand eines Ablaufdiagramms.



**Abb. 1:** Übersicht der Arbeitspakete

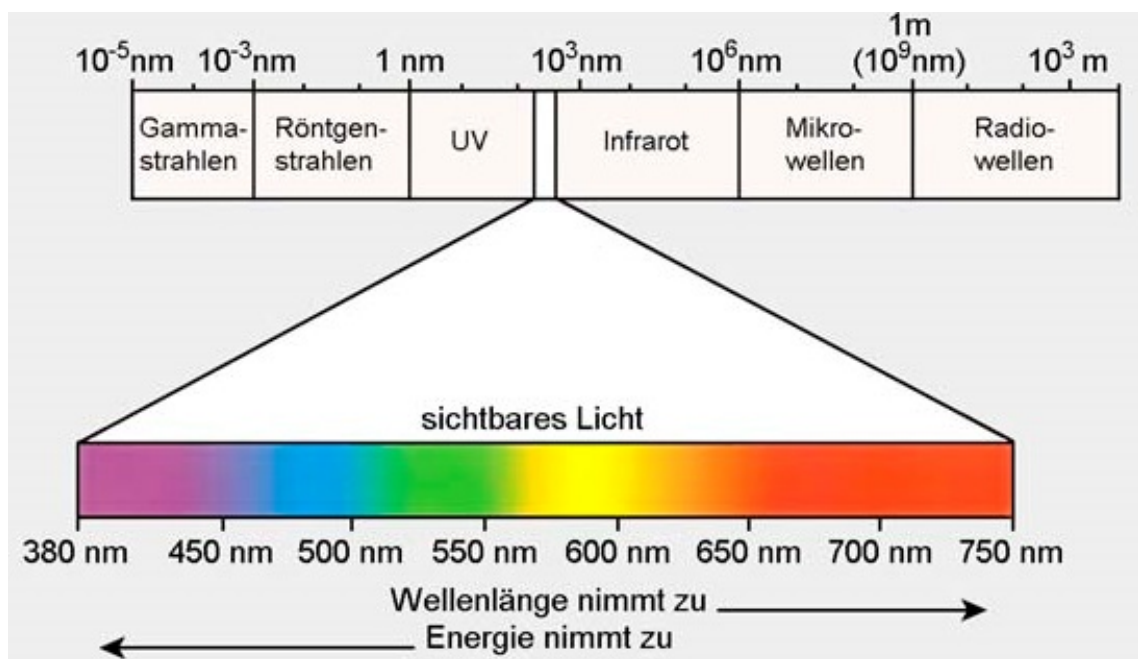
Mit dem neu entwickelten Messsystem wird abschließend ein weiterer Test durchgeführt, um die Übertragbarkeit auf vergleichbare Anwendungen zu überprüfen. FMAS soll dabei die Verteilung und die Intensität der Strahlungsflussdichte einer UV-Lampe mit konzentrierendem Reflektor ermitteln.

## 2 Grundlagen

Um die für die Entwicklung von FMAS notwendigen Kenntnisse herauszuarbeiten, beschreiben die nachfolgenden Kapitel die physikalischen Eigenschaften optischer Strahlung. Darüber hinaus werden Aufbau und Funktion der DLR-eigenen Großanlagen Sonnenofen, Hochleistungsstrahler sowie des Solarturms vorgestellt, da diese der Verifizierung des Messsystems FMAS dienen. Das abschließende Kapitel dieses Abschnitts gibt einen Überblick über das bestehende Messsystem FATMES.

### 2.1 Kenngrößen optischer Strahlung

Optische Strahlung ist Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums und kann als Überlagerung (Superposition) von elektrischen und magnetischen Wellen beschrieben werden. Das gesamte Spektrum wird abhängig von der Wellenlänge in verschiedene Bereiche eingeteilt (Abb. 2).



**Abb. 2:** Elektromagnetisches Wellenspektrum [1]

Für den Menschen sichtbares Licht liegt im Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm. Bei elektromagnetischen Wellen handelt es sich um harmonische Schwingungen, die sich mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit  $c$  ausbreiten. Zwischen der Frequenz  $\nu$  und der Wellenlänge  $\lambda$  besteht folgender Zusammenhang:

$$\lambda \cdot \nu = c \quad (1)$$

Die Energie ist proportional zur Frequenz und damit antiproportional zur Wellenlänge. Je geringer die Wellenlänge, desto höher ist die Energie der Strahlung. Ultraviolette Strahlung (UV) ist energiereicher als infrarote Strahlung (IR) und energieärmer als Gammastrahlung.

Zur mathematischen Beschreibung elektromagnetischer Strahlung werden folgende physikalische Größen verwendet:

**Tab. 1:** Kenngrößen optischer Strahlung (vgl. [2])

Größe	Einheit	Beschreibung
Strahlungsfluss $\Phi$	W	Strahlungsenergie pro Zeit
Strahlungsenergie Q	J	Energie einer Anzahl von Photonen
Strahlungsstärke I	W/sr	Strahlungsfluss pro Raumwinkel
Bestrahlungsstärke E	W/m <sup>2</sup>	Strahlungsfluss pro effektiver Empfängerfläche
Spez. Ausstrahlung M	W/m <sup>2</sup>	Strahlungsfluss pro effektiver Senderfläche
Bestrahlung H	J/m <sup>2</sup>	Strahlungsmenge pro effektiver Empfängerfläche
Strahldichte L	W/(m <sup>2</sup> sr <sup>2</sup> )	Strahlungsfluss pro Raumwinkel und Senderfläche

Senderflächen sind Strahlungsquellen, die elektromagnetische Wellen emittieren. Als Empfängerflächen werden Bereiche bezeichnet, von denen Strahlung reflektiert oder absorbiert wird. In der Literatur finden sich für die verschiedenen physikalischen Größen aus Tabelle 1 unterschiedliche Bezeichnungen:

- Strahlungsfluss  $\triangleq$  Strahlungsleistung
- Strahlungsenergie  $\triangleq$  Strahlungsmenge
- Strahlungsstärke  $\triangleq$  Strahlstärke  $\triangleq$  Strahlungsintensität
- Bestrahlungsstärke  $\triangleq$  Strahlungsstromdichte  $\triangleq$  Strahlungsflussdichte
- spezifische Ausstrahlung  $\triangleq$  Ausstrahlungsstromdichte  $\triangleq$  Ausstrahlungsflussdichte

Bei Anwendungen mit konzentrierter Solarstrahlung haben sich die Begriffe Strahlungsflussdichte E in kW/m<sup>2</sup> und Strahlungsfluss  $\Phi$  in kW oder MW etabliert. Sie werden zur Beschreibung von Strahlenbündeln auf Empfängerflächen verwendet.

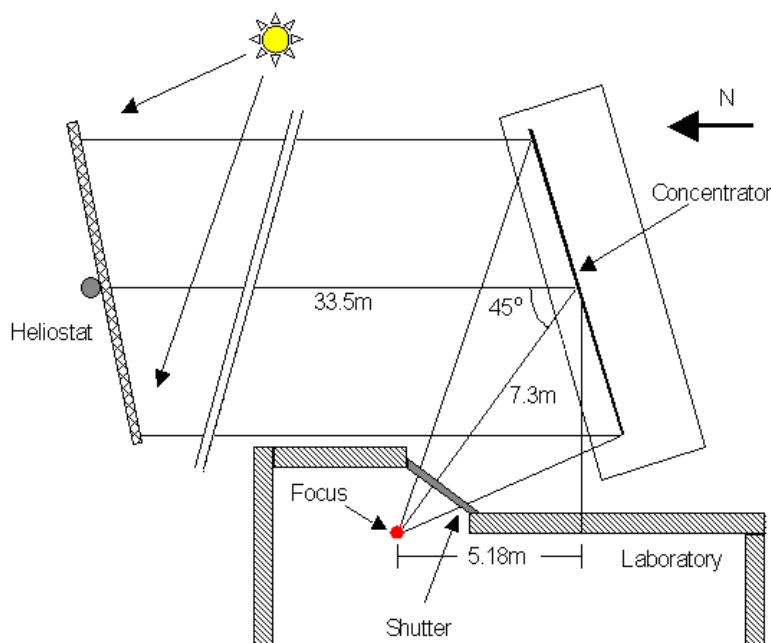
## 2.2 CSP am DLR-Institut für Solarforschung

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts und vor allem heute, im Rahmen der vieldiskutierten Energiewende, kommt der Nutzung von Solarstrahlung eine große Bedeutung zu. Zwei wesentliche Technologien nutzen aktuell die Sonne als Energielieferanten – die auf Halbleitermaterialien basierende Photovoltaik (PV) und die konzentrierte Sonnenenergie (CSP – Concentrated Solar Power). Während PV-Systeme in der Praxis derzeit Wirkungsgrade zwischen 10 % und 15 % im Neuzustand verwirklichen, kommen CSP-

Kraftwerke auf bis zu 30 %. Deshalb und aufgrund der aufwendigen Gewinnung und Herstellung der PV-Halbleitermaterialien arbeitet das Institut für Solarforschung des DLR als Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich an der Weiterentwicklung von CSP-basierten Technologien. Zur Qualifizierung von solarbetriebenen Prozessen, wie der Wasserspaltung zur  $\text{CO}_2$ -freien Wasserstoffherzeugung oder der Stromerzeugung mittels Dampfturbine, stehen dem Institut derzeit drei Großanlagen zur Verfügung. Der Sonnenofen und der Hochleistungsstrahler am Standort Köln ermöglichen Experimente im Labormaßstab und der Solarturm in Jülich verfügt über eine Forschungsebene für Versuche im Technikumsmaßstab. Der Hauptreceiver des Solarturms ist an einen Wasser-Dampf-Kreislauf mit Turbine zur Stromerzeugung gekoppelt. In diesem Solarturmkraftwerk werden zudem moderne Wärmespeichertechnologien entwickelt und getestet. Im Bau befinden sich außerdem ein Multifokus-Solarturm sowie ein fünfzehnmal größerer Hochleistungsstrahler. Auch in Spanien auf der Plataforma Solar de Almeria arbeitet das DLR-Institut für Solarforschung an verschiedenen CSP-Technologien wie Turmkraftwerken, Parabolrinnen- und Dish-Stirling-Anlagen mit.

### 2.2.1 Sonnenofen

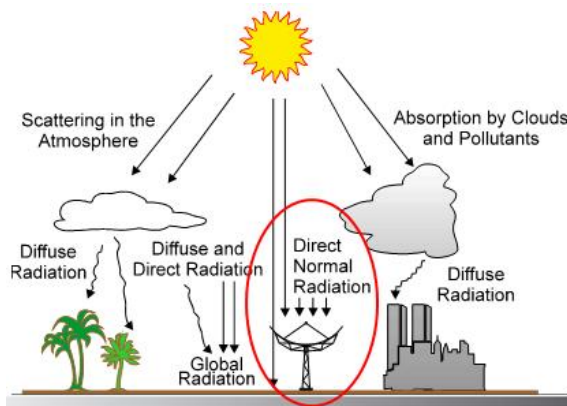
Der Sonnenofen des DLR am Standort Köln besteht in seiner Grundstruktur seit 1994 und dient der Erzeugung hochkonzentrierter Solarstrahlung. Folgende Skizze (Abb. 3) verdeutlicht das Funktionsprinzip des Sonnenofens.



**Abb. 3:** Skizze des Sonnenofens beim DLR in Köln [3]

Der in zwei Drehachsen dem Sonnenstand nachgeführte Spiegel (Heliostat) dient der Umlenkung der Sonnenstrahlen auf den Konzentrator. Azimut- und Elevationswinkel der Sonne werden dazu standort- und ortszeitabhängig berechnet. Es ist anzumerken, dass nur senkrecht von der Sonne ausgehende Direktstrahlung umgelenkt werden

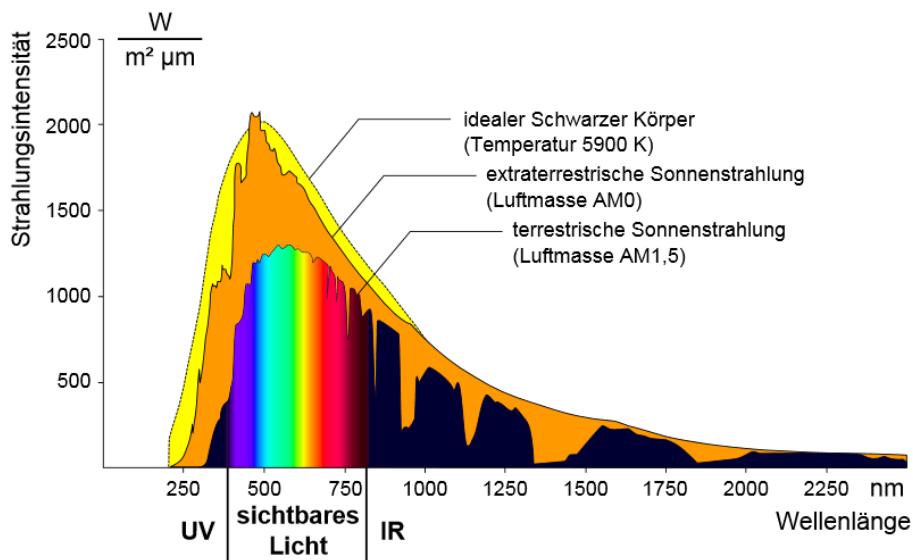
kann, die sogenannte DNI (Direct Normal Irradiation). Dies gilt für alle CSP-Technologien und unterscheidet sie von der Photovoltaik, welche auch diffuse Strahlung zur Energiegewinnung nutzt.



**Abb. 4:** Direkt- und Diffus-Strahlung [4]

Wie Abbildung 4 zeigt, entsteht diffuse Solarstrahlung im Gegensatz zu direkter Solarstrahlung aufgrund verschiedener Partikel und Bestandteile in der Erdatmosphäre. Die von der Sonne ausgehenden Strahlen werden an Festkörpern und Flüssigkeiten gestreut und führen zu diffusem Licht auf der Erdoberfläche. Die weniger gestreuten Strahlen werden ab einer Strahlungsflussdichte von  $120 \text{ W/m}^2$  als DNI definiert. Diese Strahlen erzeugen Licht, das bei der Beleuchtung von Objekten zu Schattenwurf führt. Als Globalstrahlung wird schließlich die gesamte auf der Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung bezeichnet, die sich aus der DNI und der diffusen Strahlung zusammensetzt.

Der Heliostat des Sonnenofens reflektiert aus der Direktstrahlung aufgrund seiner Titanoxidbeschichtung das gesamte solare Spektrum von  $280 \text{ nm}$  (mittlere Ultraviolettstrahlung: UV-B) bis etwa  $3 \mu\text{m}$  (nahe Infrarotstrahlung: NIR), welches nach Absorption in der Erdatmosphäre zur Verfügung steht (Abb. 5, terrestrische Sonnenstrahlung).



**Abb. 5:** solares Spektrum außerhalb und auf der Erde [5]

Der Konzentrator des Sonnenofens besteht aus 159 hexagonalen Hohlspiegeln, welche die vom Heliostaten auftreffende Strahlung auf das im Gebäude befindliche Experiment umlenken. Dabei wirkt jeder einzelne Hohlspiegel als Konzentrator. Die sphärische Form der Hohlspiegel ist je nach Abstand zum Fokus leicht unterschiedlich, damit sie alle auf den Brennpunkt fokussieren, der von den mittleren Spiegelreihen etwa 7,3 m entfernt liegt (Abb. 3). Der Konzentrator ist zudem nach dem Off-Axis-Prinzip angeordnet, so dass der Fokusbereich außerhalb des vom Heliostaten reflektierten Strahlenganges liegt. Bei einer DNI im Bereich von  $900 \text{ W/m}^2$  können im Fokus eine Strahlungsflussdichte von  $4,5 \text{ MW/m}^2$  auf einer Fläche von  $2 \text{ cm}^2$  und eine Gesamtleistung von mehr als  $20 \text{ kW}$  erreicht werden.

Die nachfolgenden Fotos zeigen den Sonnenofen während des Betriebes. Rechts in Abbildung 6 befindet sich der Heliostat, links der Konzentrator in einer vor der Witterung geschützten Halle und daneben das Labor mit dem sichtbaren Fokus. Sowohl Konzentrator als auch Labor können verschlossen werden. Die Halle des Konzentrators verfügt über ein Rolltor, welches den vom Heliostaten reflektierten Strahlengang unterbricht. Zwischen Konzentrator und Labor befindet sich ein stufenlos steuerbarer Shutter, mit dem die Leistung auf dem Experiment reguliert werden kann.



**Abb. 6:** Foto des Sonnenofens beim DLR in Köln [3]

Die nächste Darstellung (Abb. 7) zeigt den Konzentrator bei geöffnetem Rolltor. Rechts ist die Rückseite des Heliostaten mit seinen beiden Antriebsmotoren zur Sonnennachführung zu erkennen.



**Abb. 7:** Blick auf den Konzentrator mit 159 Hohlspiegeln [3]

### 2.2.2 Hochleistungsstrahler

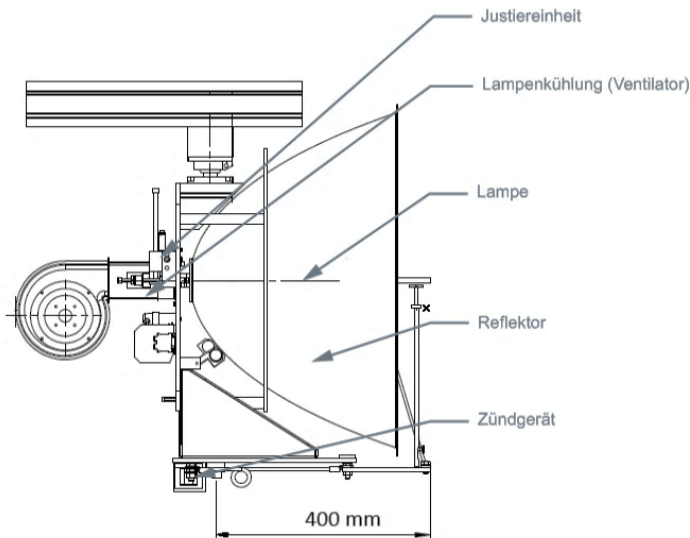
Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) betreibt an seinem Institut für Solarforschung neben dem Sonnenofen auch einen Hochleistungsstrahler (HLS) zur Erzeugung von künstlicher Solarstrahlung (Abb. 8). Am Standort Köln-Porz besteht der HLS aus zehn Xenon-Kurzbogenlampen in elliptischen Reflektoren, die dem Sonnenlicht ähnliche Strahlung mit bis zu  $4,1 \text{ MW/m}^2$  auf einer Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  konzentrieren. Die Farbtemperatur beträgt ca.  $5500 \text{ K}$ , welches annähernd der Oberflächentemperatur der Sonne entspricht.



**Abb. 8:** HLS des DLR in Köln-Porz [3]

Abbildung 9 zeigt den Aufbau einer HLS-Lampe, wie er derzeit beim DLR verwendet wird. Die Skizze zeigt die Luftkühlung per Radialgebläse und den Reflektor, der die Lampe umgibt.

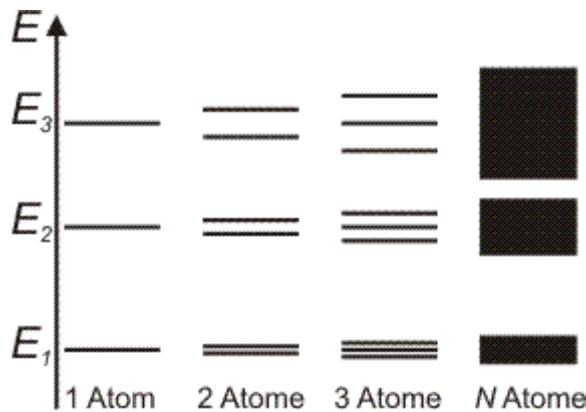




**Abb. 9:** Seitenansicht einer HLS-Lampe [3]

Der elliptisch geformte Reflektor (Ellipsoid) bündelt die emittierte Strahlung von der im ersten Brennpunkt befindlichen Lampe im 3 m entfernten zweiten Brennpunkt. Die Justiereinheit dient der Drehung der Lampe um seine horizontale und um seine vertikale Achse.

Bei den am HLS eingesetzten Xenon-Kurzbogenlampen handelt es sich um Gasentladungslampen, in denen ein Lichtbogen unter hohem Druck (ca. 80 bar) in reiner Xenongasatmosphäre brennt. Diese Lampen werden ebenso für Kinoprojektoren, Leuchttürme und in der Automobilbranche eingesetzt, da ihr Lichtspektrum dem der Sonne sehr ähnlich ist und kaltweißes Tageslicht erzeugt wird. Die Kathode ist spitz ausgeführt, um die Richtung des Lichtbogens vorgeben zu können. Darüber hinaus befindet sich am Gestell jeder Lampe ein zusätzlicher Dauermagnet, um den Lichtbogen zu stabilisieren. Die Anode ist hingegen flacher und größer dimensioniert, um den bei Elektronenbeschuss entstehenden Temperaturen standhalten zu können. Durch die hohe Stromdichte des Lichtbogens zwischen diesen beiden Wolfram-Elektroden wird das Xenon-Gas aufgeheizt und ionisiert, so dass ein elektrisch leitendes Plasma entsteht und der Lichtbogen erhalten bleibt. Der durch die hohe Temperatur im Quarzglaskolben entstehende Druck fördert die Verbreiterung der Spektrallinien aufgrund der Niveaufspaltung der aufeinanderstoßenden Teilchen. Die Ausgangsenergieniveaus der Elektronen spalten sich dabei fortschreitend in höhere und niedrigere Niveaus auf, was ein nahezu kontinuierliches Spektrum im sichtbaren Bereich zwischen 380 nm und 750 nm zur Folge hat. Außerdem geht von den Xenon-Gasentladungslampen, wie auch von der Sonne, kurzwellige UV-Strahlung mit hoher Leistungsdichte aus.



**Abb. 10:** Niveaufenspaltung [2]

Diese Aufspaltung der Energieniveaus im Plasma unter hohem Druck wird Druck- oder auch Stoßverbreiterung [6] genannt. Die sehr schmalbandige Emission eines Photons durch ein Plasma-Ion wird durch die Wechselwirkung mit anderen Atomen verbreitert. Wenn während des Übergangs eines Elektrons in ein anderes Energieniveau ein Stoß geschieht, ändert sich die Phase der Schwingung im Vergleich zu der vor dem Stoß. Durch Erhöhung der Temperatur im Plasma erhöhen sich der Druck und damit die Anzahl der Stöße pro Zeiteinheit, die mittlere freie Weglänge der Ionen verkürzt sich. Damit ändert sich die Wellenlänge des emittierten Lichts je mehr, desto häufiger Stöße passieren ( $\Delta\lambda = 1/\Delta t$ ). Die Menge der sich ergebenden Energieniveauabstände  $\Delta E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$  (Planck'sche Wirkungsquantum:  $h = \text{const}$ ) ruft viele unterschiedliche Frequenzen  $\nu$  und aufgrund des Zusammenhangs  $\lambda = c/\nu$  (Lichtgeschwindigkeit:  $c = \text{const}$ ) auch verschiedene Wellenlängen  $\lambda$  hervor, so dass die Gesamtheit des emittierten Lichts für das menschliche Auge weiß erscheint. Alle Wellenlängen im sichtbaren Bereich von etwa 380 nm bis 780 nm (und ebenso nicht sichtbare UV-Wellenlängen) werden also aufgrund der Stoßverbreiterung emittiert.

### 2.2.3 Solarturm Jülich

Das DLR betreibt neben den beiden Anlagen am Standort Köln zudem in Jülich ein solarthermisches Versuchs- und Demonstrationskraftwerk in Form eines Solarturms mit offenem, volumetrischem Receiver (STJ). Nach einer etwa fünfjährigen Planungs- und Bauphase hat das DLR den Solarturm Mitte 2011 von den Stadtwerken Jülich GmbH übernommen und nutzt ihn seitdem einerseits für Experimente im Technikumsmaßstab, die auf der Forschungsebene durchgeführt werden. Diese liegt etwa auf halber Höhe des Solarturms. Der Hauptreceiver an der höchsten Stelle bei ca. 60 m ist andererseits an einen Wasser-Dampf-Kreislauf mit Turbine zur Stromerzeugung gekoppelt. In diesem Kraftwerk werden neben Komponententests, wie beispielsweise der Qualifizierung neuer Absorberwerkstoffe, auch moderne Wärmespeichertechnologien entwickelt und geprüft.



**Abb. 11:** Solarturm Jülich (Luftaufnahme)

Der Turm verfügt über insgesamt 2153 Heliostaten, die wie beim Sonnenofen in Köln in den Sonnenwinkeln Azimut und Elevation nachgeführt werden. Sie können einzeln gesteuert und wahlweise auf die Forschungsebene oder den Hauptreceiver ausgerichtet werden. Der Hauptreceiver besteht derzeit aus porösen, keramischen Absorbern, durch die von den Heliostaten reflektierte Solarstrahlung auf ca. 700 °C erhitzte Umgebungsluft eingesaugt wird. Im nachgeschalteten Wasser-Dampf-Kreislauf wird so überhitzter Wasserdampf zum Betrieb der Dampfturbine erzeugt.



**Abb. 12:** Blick auf Hauptreceiver und Forschungsebene des STJ vom Heliostatfeld

Die Strahlungsleistung auf dem 22 m<sup>2</sup> großen Hauptreceiver beträgt bis zu 20 MW und der Gesamtwirkungsgrad bei der Stromerzeugung liegt bei ca. 8 %. Die Strahlungsflussdichte wird auf der Forschungsebene des STJ derzeit mit Hilfe einer sogenannten Movingbar bestimmt. Diese Movingbar ist eine lambertsche, wassergekühlte Alumini-

umplatte mit eingebautem Radiometer und wird parallel vor dem Experiment durch den Strahlengang bewegt (Abb. 46). Eine im Heliostatfeld befindliche Messkamera nimmt an verschiedenen Positionen Einzelbilder auf, die schließlich zu einem Gesamtbild zusammengefügt und ausgewertet werden.

#### 2.2.4 Messsystem FATMES



An Sonnenofen und Hochleistungsstrahler wird die Strahlungsflussdichte seit über 20 Jahren mit Hilfe des eigens für diese Anwendung entwickelten Messsystems FATMES ermittelt. Es erfordert einen großen Schaltschrank mit aus heutiger Sicht veralteter Hardware, leistungselektronischen Bauteilen und Datenerfassungsmodulen (Abb. 13). Die Komponenten innerhalb und außerhalb des Schaltschranks fallen vermehrt aus und die Ersatzteilbeschaffung ist problematisch. Dieser Umstand erfordert die Entwicklung eines neuen Messsystems mit Hardware auf dem Stand der Technik. Darüber hinaus werden die Algorithmen, die FATMES zur Bildauswertung nutzt, vom Motorola-Prozessor für heutige Verhältnisse sehr langsam abgearbeitet. Die Bildentzerrung mit der Rechnerarchitektur VAX aus dem Jahre 1977 dauert 3 Minuten.

**Abb. 13:** Schaltschrank

Der fest installierte und schwere Schaltschrank macht das Messsystem zudem immobil und erlaubt nur Messungen an Sonnenofen und Hochleistungsstrahler, die sich in einem gemeinsamen Gebäude befinden. Die mit FATMES kompatiblen Messkameras verfügen über vergleichsweise niedrigauflösende Chips mit 512 x 512 Pixeln und veralteten Schnittstellen. Heutige Ethernet-basierte Kameras erlauben eine schnelle Verbindung mit jedem Notebook, wohingegen BNC und Chinch nicht mehr gebräuchlich sind. Deren Verwendung in Verbindung mit modernen Computersystemen verursacht somit höhere Kosten. Zudem führen die erforderlichen Videoadapter stets zu Verlusten im Signal.

Auf dem Monitor links in Abbildung 14 ist das Betriebssystem VMS dargestellt, welches ausschließlich über Tastatureingaben bedient werden kann. FATMES nutzt daneben einen zweiten Monitor zur Anzeige des Kamerabildes. Darauf werden auch Passpunkte markiert (Kapitel 3.3.5) und gespeicherte Bilder angezeigt. Um eine unbeabsichtigte Verschiebung des fokussierten Strahlenbündels feststellen zu können, die beispielsweise durch Windbewegungen am Heliostaten des Sonnenofens hervorgerufen werden können, wird auf der Glasscheibe des Bildmonitors ein Filzstiftpunkt im Flussdichtemaximum angebracht. Diese und weitere Aspekte lassen das Betriebssystem VMS in Zeiten von Windows-PCs und Touchscreens als bedienerunfreundlich erscheinen. Nur wenige Mitarbeiter können FATMES bedienen und die Messergebnisse gewissenhaft interpretieren. Durch die Neuentwicklung von FMAS soll die Strahlungsflussdichtemessung auch weiteren Personen zugänglich gemacht werden.





**Abb. 14:** Bedienoberfläche von FATMES

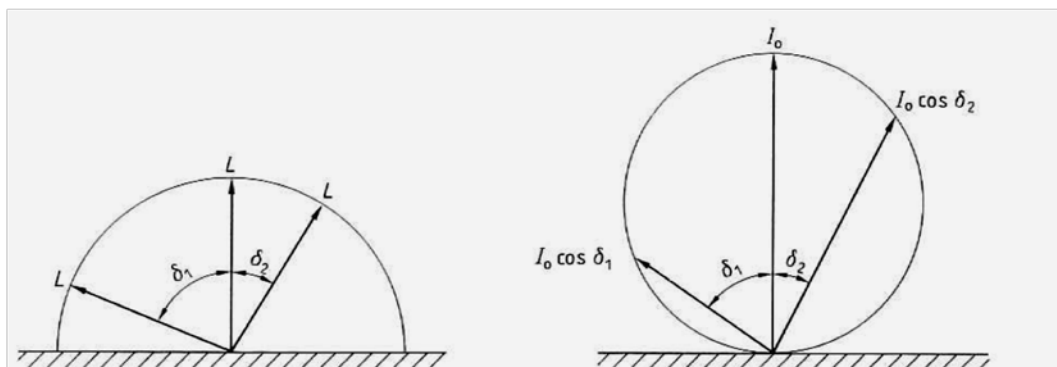
Zuletzt sei die intransparente Bildauswertung als der bedeutendste Nachteil des Messsystems FATMES genannt. Aus der Dokumentation wird zwar ersichtlich, welche Korrekturmaßnahmen an einem Kamerabild durchgeführt, jedoch nicht wie diese im Detail umgesetzt werden. So bleibt der Anwender beispielsweise im Unklaren über die Art der Interpolation bei der Bildentzerrung oder die angewendete Shadingkorrektur (Kapitel 3.3.3). Messdaten wie die Flusssichtmatrix können darüber hinaus aufgrund ausgefallener und irreparabler Hardware nicht mehr digital zur Verfügung gestellt, sondern nur noch über einen teilweise funktionstüchtigen Schwarzweißdrucker mit spezieller Schnittstelle ausgedruckt werden. Eine weiterführende Auswertung der Messdaten ist dadurch nicht möglich.

### 3 Optische Strahlungsmessung

Das folgende Grundlagenkapitel erläutert die optische Messung von Strahlung. Dazu werden neben den benötigten Komponenten wie Messkameras auch Aspekte der digitalen Bildverarbeitung thematisiert. Diese Übersicht dient der Vorbereitung auf die Softwareentwicklung für FMAS, indem die verwendeten Algorithmen allgemeingültig dargestellt werden.

#### 3.1 Lambertsche Oberflächen

Benannt nach Johann Heinrich Lambert, der unter anderem den Zusammenhang von Abstrahlwinkel und Strahldichte erforscht hat, ist eine lambertsche Oberfläche definiert als eine ideal diffus reflektierende (Strahlungs-)Empfängerfläche. Diffuse Reflektion tritt bei bestrahlten Oberflächen (Empfängerflächen) auf, deren Rauheit größer als die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung ist. Die Strahlen werden dabei mehrfach in den Tälern der Oberflächenstruktur reflektiert.



**Abb. 15:** lambertsches Kosinusgesetz (li.: Strahldichte  $L$ ; re.: Strahlstärke  $I$ ) [7]

Eine leuchtende Fläche, die ein Lambertstrahler ist, sieht aus allen Richtungen gleich hell aus [7]. Diese Aussage bezieht sich auf die Form der Strahldichte  $L$ , welche den Strahlungsfluss pro Raumwinkel und pro Fläche ( $A$ ) bezeichnet.  $L$  ist bei einem ideal diffusen Lambertstrahler über die Oberfläche einer Halbkugel betragsmäßig konstant. Der Strahlungsfluss pro Raumwinkel, die Strahlstärke  $I$ , ist eine Funktion des Winkels  $\delta$  gegen die Normale der Oberfläche. Der Betrag von  $I$  ist maximal bei einem Einfallswinkel von  $\delta = 0^\circ$  und null bei  $\delta = 90^\circ$ . Das lambertsche Kosinusgesetz (2) beschreibt diese Eigenschaft mathematisch.

$$L = \frac{I(\delta)}{A \cdot \cos(\delta)} = \text{const.} \quad (2)$$

## 3.2 Aufnahmesysteme

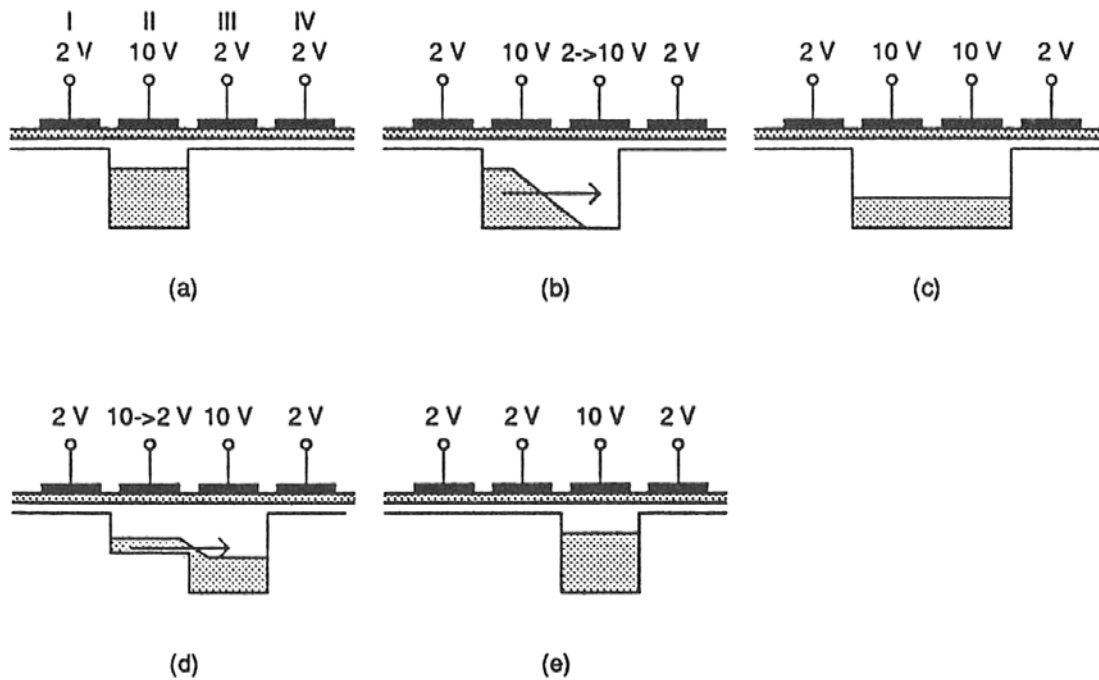
Die in dieser Arbeit thematisierte optische Strahlungsmessung gehört definitionsgemäß in die Klasse der Nahbereichsphotogrammetrie mit einem Abstand von Kamera und Messobjekt bis zu etwa 100 Metern. Der Strahlungsfluss und dessen Verteilung werden aus einem digitalen Foto extrahiert, welches ein diffus reflektierendes, bestrahltes Target (Abb. 21) zeigt. Zur Aufnahme eines solchen Bildes werden mindestens eine Kamera und eine abbildende Optik (Kameraobjektiv) benötigt, meist unter Verwendung zusätzlicher Filter. Die folgenden Abschnitte beschreiben die grundsätzliche Funktionsweise dieser Komponenten.

### 3.2.1 CCD-Digitalkameras

In der digitalen Fotografie haben während der letzten Dekaden vor allem Sensoren vom Typ CCD (charge coupled device) die weiteste Verbreitung gefunden. Die Fertigung dieser Chips ist mit geringem Aufwand verbunden und sie gelten als vergleichsweise rauschunempfindlich. Aus diesem Grund wird deren Prinzip im Folgenden genauer erläutert und auf andere Technologien wie den CMOS-Sensor oder die mittlerweile veraltete analoge Fototechnik nicht weiter eingegangen.

CCD-Chips bestehen aus flächig angeordneten Fotodioden, die auf dem Prinzip des fotoelektrischen Effekts in Halbleitermaterialien wie Silizium oder Germanium basieren. Diese verändern durch Absorption von Strahlung ihre elektrische Leitfähigkeit, wenn die Strahlungsenergie mindestens so hoch ist, wie der Abstand der Energieniveaus von Valenz- und Leitungsband eines Atoms aus diesem Material. Erst dann erhöht sich das Energieniveau von Valenzelektronen aus dem zunächst vollbesetzten und somit nicht leitenden Valenzband, welche sich dann auf dem zunächst leeren, ebenfalls nicht leitenden Leitungsband befinden. Das Atom weist dann eine elektrische Ladung nach außen auf und im Atomgitter des Halbleitermaterials kann durch Austausch freier Ladungsträger ein elektrischer Strom fließen.

Aus den Ladungen der einzelnen Fotodioden (Pixel) kann unter Kenntnis des Materialverhaltens auf die Intensität der absorbierten Strahlung geschlossen werden. Die Methode der Ladungsverschiebung ermöglicht ein serielles Auslesen der Pixelwerte.



**Abb. 16:** Ladungsverschiebung im CCD-Chip [8]

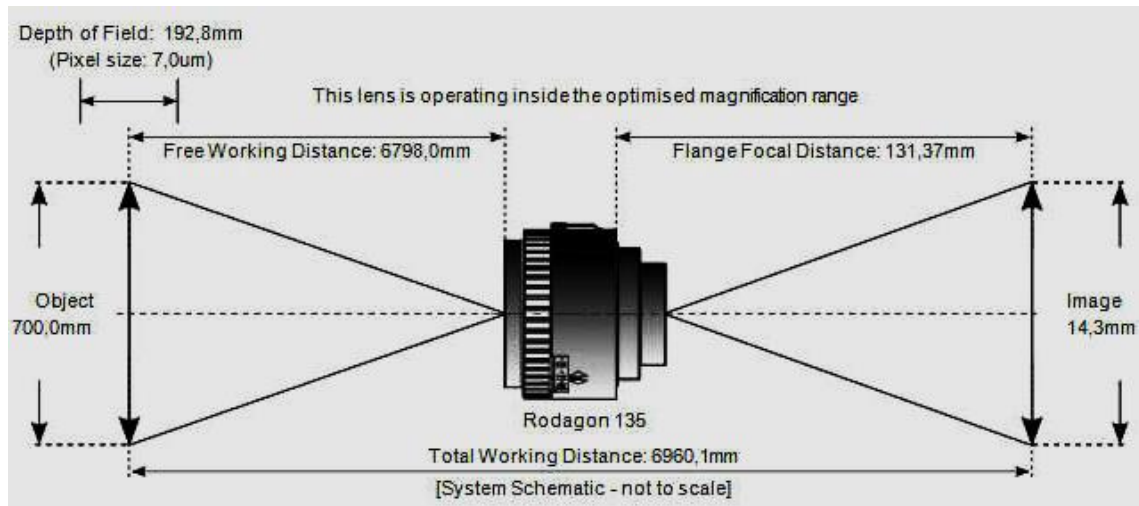
Die Fotodioden sind durch eine Isolationschicht von einem dotierten Halbleitermaterial getrennt, worin Ladungen wie in einem Kondensator gespeichert werden können (Potentialtopf). Diese Ladungen werden dabei durch sequenzielles Verändern der Diodenspannungen bis zum Messgerät transportiert. In Abbildung 16 wird dieses Verfahren anhand eines grauen Bereichs, welcher der Ladungsmenge entspricht, skizziert.

Ein digitales Foto besteht also aus den wie beschrieben ermittelten Ladungen, welche in Strahlungsintensitäten umgerechnet und wieder der jeweiligen Koordinate im Array aus Fotodioden zugewiesen wurde. Das Foto kann mathematisch auch als zweidimensionale Matrix mit Helligkeitswerten beschrieben werden. Die Matrixindizes dieser Werte entsprechen dabei den Positionen der Fotodioden auf dem Chip. Die Auflösung eines Bildsensors wird angegeben als „Spaltenanzahl x Zeilenanzahl“, also als das Verhältnis der nebeneinander angeordneten Dioden zu den untereinander angeordneten. Aktuelle FullHD-Aufnahmen zeichnen sich beispielsweise durch 1920 x 1080 Bildpunkte im Verhältnis 16 (horizontal) zu 9 (vertikal) aus (16:9), wohingegen der mittlerweile veraltete TV-Standard nur eine Auflösung von 640 x 480 im Format 4:3 aufwies.

### 3.2.2 Objektive und Blenden

Um den Kamerasensor der gesamten zu beurteilenden Strahlung auszusetzen, bedarf es einer abbildenden Optik, da der Chip wesentlich kleiner ist als das zu fotografierende Objekt.



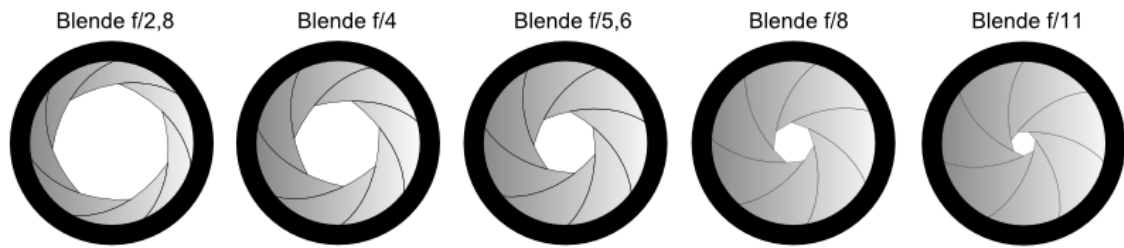


**Abb. 17:** Kameraobjektiv [9]

Bei Kameras befinden sich die dafür benötigten optischen Bauteile in einem Objektiv, welches in der optischen Achse vor dem Chip montiert wird. Abbildung 17 zeigt exemplarisch die Kenngrößen eines solchen Kameraobjektivs. Die Linsen im Inneren ermöglichen die Abbildung eines quadratischen Objekts mit einer maximalen Seitenlänge von 70 cm auf einem ebenfalls quadratischen Chip mit einer Seitenlänge von 14,3 mm. Der Abstand von Objekt zu Chip muss dafür in etwa 7 m betragen und das Objektiv ist mittels Adapter in einem Abstand von 13 cm zum Sensor zu platzieren. Der Abstand zweier Pixel in einem damit aufgenommenen Foto entspricht 7 µm in der Objektebene. Würde man beispielsweise ein mechanisches Bauteil exakt senkrecht zur optischen Achse aufstellen und unter Einhaltung aller Abstandsmaße fotografieren, könnten Maße wie Breite und Höhe mit einer Genauigkeit von bis zu 7 µm aus dem Bild ermittelt werden. Auch bei der Messung optischer Strahlung ist die Pixelgröße ein wichtiges Gütekriterium.

Für jeden Messaufbau ist die passende Optik so auszuwählen, dass vor allem die Objektgröße sowie der Abstand zwischen Kamera und Objekt berücksichtigt werden. Mit inkompatiblen Abstandsmaßen können keine Fotos generiert werden, die eine präzise Extraktion von Merkmalen erlauben, beispielsweise von Bauteilmaßen oder Flussdichteverteilungen optischer Strahlung.

Meist beinhalten Objektive neben der abbildenden Optik außerdem eine verstellbare Blende, die eine Helligkeitsregulierung des Fotos erlaubt und zudem Einfluss auf die Tiefenschärfe hat. Da bei der Strahlungsflussdichtemessung nur eine Objektebene interessiert, die des reflektierenden Targets, kommt der Tiefenschärfe dabei nur eine zu vernachlässigende Bedeutung zu.



**Abb. 18:** Blenden im Kameraobjektiv [10]

Die Blendeneinstellung wird über die Blendenzahl angegeben, den Quotienten aus Bildweite und Blendenöffnung. Die Bildweite bezeichnet den Abstand der Blende zur Bildebene in Richtung des Chips. Die Blendenöffnung beschreibt den lichtdurchlässigen Durchmesser. Beispielsweise bedeutet der Wert  $f/2,8$  links in Abbildung 18, dass die Bildweite das 2,8-fache des Blendendurchmessers beträgt. Bei einer Blendenöffnung von 10 mm würde die Bildweite 28 mm betragen. Kleine Blendenzahlen stehen für große Durchmesser und führen zu geringerer Tiefenschärfe als große Blendenzahlen. Je weiter die Blende geöffnet ist, desto mehr Licht von der Bildebene erreicht den Bildsensor der Kamera. Je kleiner wiederum die Blendenöffnung, desto dunkler wird das aufgenommene Foto.

### 3.2.3 Verschlusszeit und Neutraldichtefilter

Bei der Fotografie von optischer Strahlung ist die Blende zur Verringerung der Helligkeit auf dem Chip meist nicht ausreichend. Es werden entweder zusätzliche Filter benötigt, um ein Übersteuern des Bildsensors (Kapitel 3.3.1) zu verhindern, oder die Zeit verringert, die der Chip einfallender Strahlung ausgesetzt wird. Letzteres wird entweder mechanisch über den Verschluss der Blende oder elektronisch realisiert und Verschlusszeit oder Belichtungszeit genannt. Bei sehr leistungsstarker Strahlung wie konzentrierter Solarstrahlung genügt das Verringern der Belichtungszeit in der Regel nicht für eine ausreichende Abdunkelung aus, so dass Filter vor dem Objektiv eingesetzt werden. Um die Form der Flussdichteverteilung und das Spektrum der aufzunehmenden Strahlung nicht zu verfälschen, bedient man sich homogenen Neutraldichtefiltern mit unterschiedlicher Durchlässigkeit, auch Transmission genannt. Gleichbedeutende Bezeichnungen für Neutraldichtefilter sind Graufilter, Neutralfilter und in der Kurzschreibweise auch ND-Filter. Der Zusammenhang zwischen Neutraldichte  $x$  und Transmission  $\tau$  wird durch Formel (3) beschrieben.

$$x = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right) = \lg(\tau^{-1}) = -\lg(\tau) \Leftrightarrow \tau = 10^{-x} \quad (3)$$

Dabei steht die Transmission  $\tau$  für den Quotienten aus der gefilterten Strahlungsintensität und der ursprünglichen Strahlungsintensität. Sie wird üblicherweise in % angegeben. Ein ND-Filter mit der Bezeichnung ND2 hat beispielsweise eine optische Dichte von 2 und damit eine Transmission von  $10^{-2} = 1/100 = 0,01$  bzw. 1 %. Der Bildsensor

detektiert ein Foto, das 100-fach dunkler ist als die fotografierte Szene. Wenn von der Senderfläche (Szene) eine Strahlungsintensität von 10 W/sr reflektiert würde, ergäben sich hinter dem ND2-Filter 0,1 W/sr auf dem CCD-Chip.

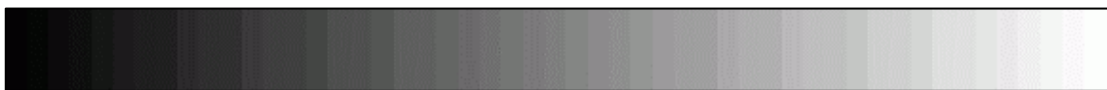
### 3.3 Bildverarbeitung

Die Software des neuen Messsystems FMAS dient in erster Linie der Korrektur und Auswertung von Kamerabildern. Ein aufgenommenes Foto wird zunächst als Rohbild bezeichnet, auf das verschiedene Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung angewendet werden müssen, um es als Messbild auswerten zu können. In den kommenden Abschnitten werden die Grundlagen zum Verständnis dieser Methoden erläutert.

#### 3.3.1 Grauwertbilder

Zur Messung von Solarstrahlung, deren Intensität für alle Wellenlängen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Abb. 2) annähernd gleich ist, eignen sich Grauwertbilder mit einer Wertigkeit pro Pixel von 8 Bit. Das kontinuierliche Spektrum lässt die Strahlung insgesamt weiß erscheinen. Die sehr hohe Strahldichte konzentrierter Solarstrahlung führt außerdem zu extrem hellem Licht im Verhältnis zur Umgebung des fokussierten Strahlenbündels. Der sich ergebende Unterschied zwischen weiß (hell) und schwarz (dunkel) kann in einem Grauwertbild ausreichend genau dargestellt werden. Zwischen schwarz und weiß bieten sie insgesamt 254 Grauwerte zur Visualisierung von Helligkeitsunterschieden. Ein Grauwertbild mit 8 Bit verfügt je Pixel über  $2^8 = 256$  mögliche Werte, die von 0 bis 255 durchnummeriert werden.

0 ist schwarz, 255 weiß und 1 bis 254 werden für unterschiedliche Grautöne von dunkel nach hell verwendet (von links nach rechts, Abb. 19). Auch für die Bildmessung von optischer Strahlung niedrigerer Leistung eignen sich 8-Bit-Grauwertbilder, solange die Möglichkeit des Abdunkelns der nicht bestrahlten Umgebungsflächen gegeben ist.



**Abb. 19:** Grauwerte von 0 bis 255 (8-bit)

#### 3.3.2 Dunkelstromkompensation

In elektronischen, digitalen Kameras werden CMOS- oder CCD-Sensoren eingesetzt, die aus lichtempfindlichen Fotodioden bestehen. Diese wandeln die einfallende Strahlung in eine elektrische Ladung, welche proportional zur Beleuchtungsstärke ist (Kapitel 3.2.1). In der Praxis zeigt sich, dass auch bei unbelichtetem Sensor geringe Ladungen in einigen Fotodioden vorhanden sind, was eine Erhöhung des jeweiligen Pixelwertes bewirkt. Eine komplett abgedunkelte Diode generiert dann anstelle eines schwarzen einen dunkelgrauen Pixel mit einem Grauwert  $> 0$ . Dieses Verhalten wird auch Dunkelstrom oder Black Shading genannt und ist auf die erhöhte Diodentemperatur aufgrund der anliegenden Versorgungsspannung zurückzuführen.

Um die Wirkung des Black Shading im Bild zu kompensieren, wird zunächst ein Dunkelbild bei verschlossener Kamera und auf Betriebstemperatur befindlichem Sensor aufgenommen. Die Grauwerte dieses Bildes lassen sich als Dunkelstrommatrix  $[D]_{ij}$  interpretieren. Die dunkelstromkorrigierte Bildmatrix  $[I]_{ij}^D$  ergibt sich dann durch Subtraktion von der Rohbildmatrix  $[I]_{ij}$  :

$$[I]_{ij}^D = [I]_{ij} - [D]_{ij} \quad (4)$$

Nach Anwendung dieser Korrektur sind alle Grauwerte des Rohbildes, die fälschlicherweise dunkelgrau dargestellt wurden, wieder schwarz. Ein Grauwert von 2 an einer bestimmten Bildposition wird zu 0, wenn an derselben Bildposition im Dunkelbild ebenfalls ein Grauwert von 2 gemessen wurde. Sollte die Berechnung auf negative Grauwerte führen, ist darauf zu achten, diese auf den Minimalwert 0 zu korrigieren. Bei einem konstanten Dunkelstromverhalten des Kamerasensors kann dieser Fall jedoch nur aufgrund von Rundungsfehlern beim Berechnen des Grauwerts aus der elektrischen Ladung auftreten.

### 3.3.3 Shadingkorrektur

Neben dem Black Shading kommt es außerdem zu sogenanntem White Shading, welches die Inhomogenität der Beleuchtungsstärke eines Bildes beschreibt. Unterschiedlich empfindliche Photodioden sowie ungleichmäßiges Ausleuchten des Sensors aufgrund von Objektivfehlern und Streulicht sind dafür maßgeblich verantwortlich. Üblicherweise zeigt sich der Effekt durch einen Helligkeitsabfall zu den Bildrändern.

Ein Shadingbild wird aufgenommen, indem die Kamera mit Objektiv gleichmäßiger Strahlung ausgesetzt wird. Dies kann einfach mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel realisiert werden. Dabei handelt es sich um eine Hohlkugel mit diffuser Beschichtung und einer dimmbaren Glühbirne auf der Innenseite. Die Strahlung wird so reflektiert, dass sich ein lambertscher Strahler ergibt, der überall homogen ausgeleuchtet ist. Die bei der späteren Verwendung erforderliche Blende und die Brennweite sind einzustellen, bevor das Foto mit der in die Kugel gerichteten Kamera aufgenommen wird. Die Glühbirne ist zudem so zu dimmen, dass die Aussteuerung des Sensors im oberen Drittel des Grauwertbereichs liegt. Diese Aufnahme entspricht der dunkelstrombehafteten Shadingmatrix  $[S]_{ij}$  und muss zunächst gemäß folgender Vorschrift korrigiert werden:

$$[S]_{ij}^D = [S]_{ij} - [D]_{ij} \quad (5)$$

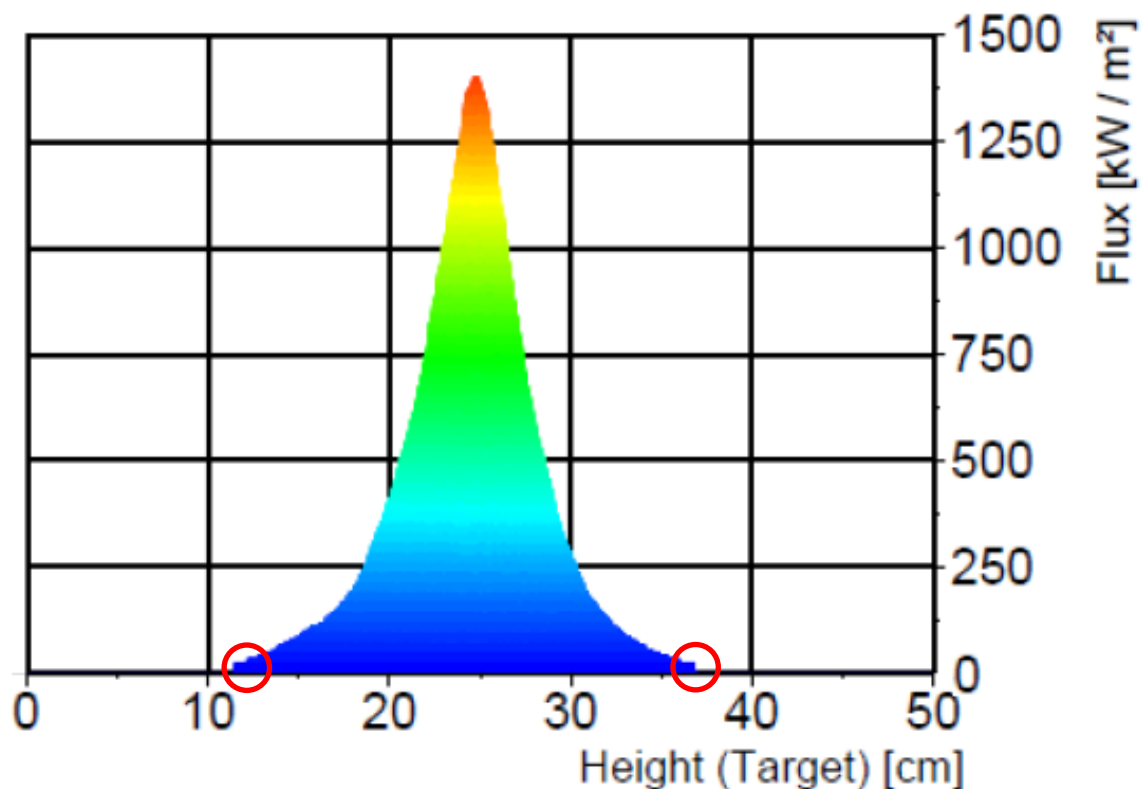
Die Kompensation des White Shading erfolgt anschließend über folgende Formel:

$$[I]_{ij}^{res} = [I]_{ij}^D \cdot \frac{\bar{S}}{[S]_{ij}^D} \quad (6)$$

Die resultierende Bildmatrix  $[I]_{ij}^{res}$  ergibt sich durch Multiplikation der dunkelstromkorrigierten Rohbildmatrix  $[I]_{ij}^D$  mit dem Quotienten aus dem durchschnittlichen Grauwert  $\bar{S}$  der dunkelstromkorrigierten Shadingmatrix  $[S]_{ij}^D$  und dieser Matrix selbst. Der Quotient entspricht somit einem Gewichtungsfaktor, der die Helligkeitsunterschiede aus dem Shadingbild widerspiegelt. Einer Division durch Null (schwarz) wird mit der Sensoraussteuerung im oberen Drittel des Grauwertbereichs vorgebeugt. Ein übliches Shadingbild sollte keine schwarzen Pixel enthalten.

### 3.3.4 Kontrastverbesserung

Nach der Kompensation des Dunkelstroms und des White Shading kann das Bild weiteren Optimierungen unterzogen werden. Bei den für die Flussdichtemessung verwendeten Aufnahmen soll der Bereich zwischen beleuchteter und unbeleuchteter Fläche deutlich hervorgehoben werden, um später den Leistungsgehalt der Verteilung beurteilen zu können (siehe Kapitel 3.4).

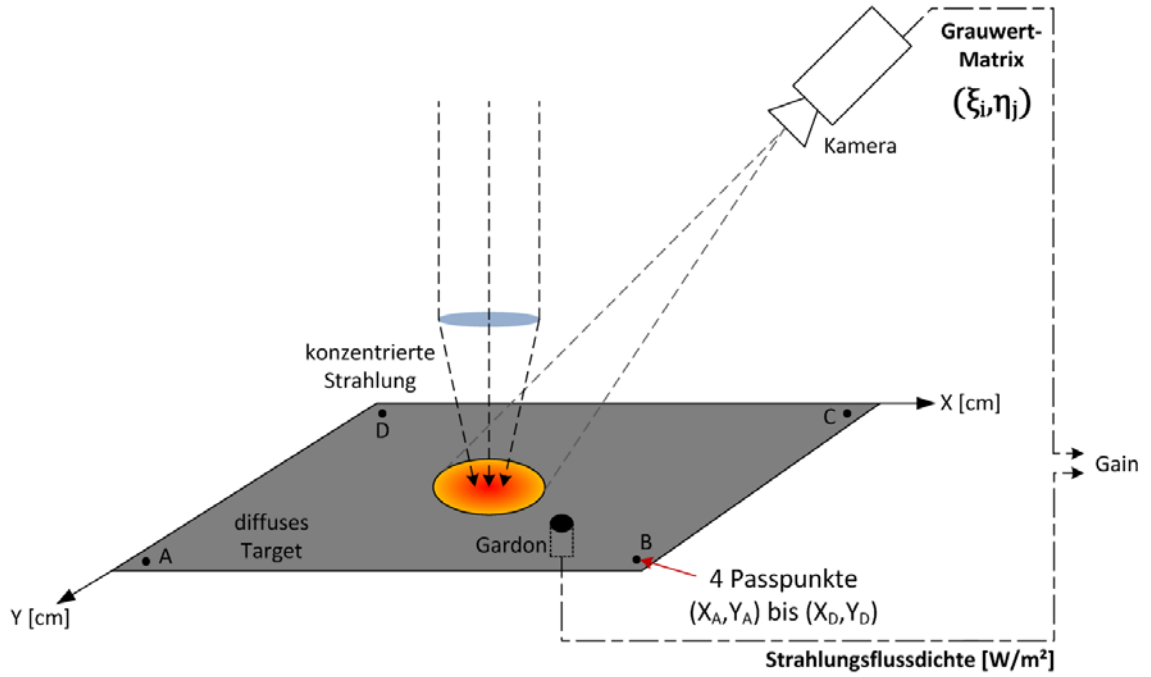


**Abb. 20:** Ränder der Flussdichteverteilung

Die Strahlung tritt auf einem annähernd lambertschen Target auf. In den Randbereichen mit sehr geringer Strahlungsflussdichte kann es aufgrund der fertigungsbedingt leicht inhomogenen Oberflächenrauheit des Targets zu Abweichungen von einem ideal diffusen Reflektor kommen. Durch Schwärzen der dunkelgrauen Pixelwerte, d. h. durch Überschreiben des alten Grauwerts mit dem Grauwert 0, wird eine definierte Grenze zwischen bestrahlter und nicht bestrahlter Oberfläche geschaffen (Abb. 20). Die Strahlungsleistung entspricht dem Flächenintegral der Flussdichteverteilung und würde ohne diese Operation in den meisten Fällen zu groß berechnet, weil sehr dunkle Pixel außerhalb der Strahlung mit einbezogen würden, auch wenn sie durch Streulicht und nicht von der zu beurteilenden Strahlungsquelle hervorgerufen werden. Das Ersetzen sehr geringer Pixelwerte mit dem Grauwert 0 entspricht in dem Fall der Strahlungsflussdichtemessung somit einer örtlichen Kontrastverbesserung.

### 3.3.5 Bildentzerrung

Die Tatsache, dass die optische Achse der zu beurteilenden Strahlung orthogonal zum lambertschen Target steht, erfordert einen Kamerastandort außerhalb des Strahlenganges. Daraus resultiert eine geometrische Verzerrung der Bildaufnahme. Um die Strahlungsflussdichte, d. h. den Strahlungsfluss pro Empfängerfläche auf dem Target, in  $\text{W/m}^2$  ermitteln zu können, bedarf es aber unbedingt der Kenntnis des Maßstabs und der richtigen Orientierung. Zur Korrektur wird eine Bildentzerrung mittels der 4-Punkt-Methode angewendet. So wird ein Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten [Pixel] und Objektkoordinaten [m] hergestellt und die geometrische Verzerrung des Bildes aufgrund des Kamerastandortes korrigiert. Die Methode erfordert zunächst vier sogenannte Passpunkte, die sich auf dem Objekt (Target) befinden und im Bild markiert werden können. Dabei dürfen keine drei dieser Punkte auf einer Geraden liegen, die Punkte müssen projektiv unabhängig sein. Die Koordinaten  $X, Y$  dieser Passpunkte in einem dem Bild übergeordneten, kartesischen Koordinatensystem werden in einer realen Maßeinheit angegeben. Die zugehörigen Bildpunkte  $\xi, \eta$  in Pixeln befinden sich im zweidimensionalen Bildkoordinatensystem des Kamerachips. Abbildung 21 zeigt den prinzipiellen Messaufbau zur optischen Flussdichtemessung. Eine Kamera blickt schräg auf das bestrahlte, diffus reflektierende Target mit den Passpunkten A bis D und einem eingelassenen Gardon-Radiometer (Kapitel 3.4.1). Während die Kamera eine relative Intensitätsverteilung der Strahlung in Form einer Grauwertmatrix ausgibt, stellt der Gardon-Sensor die Strahlungsflussdichte an einem Punkt zur Verfügung. Mit diesem Signal wird die Grauwertmatrix, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, kalibriert.



**Abb. 21:** Messaufbau zur optischen Flussdichtebestimmung

Indem die Passpunktkoordinaten  $X_A, Y_A$  bis  $X_D, Y_D$  im verzerrten Kamerabild mit den zugehörigen Bildkoordinaten  $\xi_A, \eta_A$  bis  $\xi_D, \eta_D$  verknüpft werden, erhält man die Grundlagen für die Bildentzerrung und die Skalierung von Pixel- auf reale Koordinaten. Folgende Gleichungen (vgl. [11]) verdeutlichen, dass für die 4-Punkt-Entzerrung insgesamt 8 unbekannte Parameter  $a_1$  bis  $c_2$  zu bestimmen sind:

$$X = \frac{a_1 \xi + a_2 \eta + a_3}{c_1 \xi + c_2 \eta + 1} \quad (7)$$

$$Y = \frac{b_1 \xi + b_2 \eta + b_3}{c_1 \xi + c_2 \eta + 1} \quad (8)$$

Ausmultipliziert ergeben sich diese Summen für die Objektkoordinaten:

$$X = \xi a_1 + \eta a_2 + a_3 - X \xi c_1 - X \eta c_2 \quad (9)$$

$$Y = \xi b_1 + \eta b_2 + b_3 - Y \xi c_1 - Y \eta c_2 \quad (10)$$

Mit den vier bekannten Passpunkten A, B, C und D erhält man schließlich das lineare Gleichungssystem (LGS) in Matrixschreibweise zur Bestimmung der unbekannten Parameter  $a_1$  bis  $c_2$ :

$$\begin{pmatrix} \xi_A & \eta_A & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_A \xi_A & -X_A \eta_A \\ 0 & 0 & 0 & \xi_A & \eta_A & 1 & -Y_A \xi_A & -Y_A \eta_A \\ \xi_B & \eta_B & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_B \xi_B & -X_B \eta_B \\ 0 & 0 & 0 & \xi_B & \eta_B & 1 & -Y_B \xi_B & -Y_B \eta_B \\ \xi_C & \eta_C & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_C \xi_C & -X_C \eta_C \\ 0 & 0 & 0 & \xi_C & \eta_C & 1 & -Y_C \xi_C & -Y_C \eta_C \\ \xi_D & \eta_D & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_D \xi_D & -X_D \eta_D \\ 0 & 0 & 0 & \xi_D & \eta_D & 1 & -Y_D \xi_D & -Y_D \eta_D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ X_B \\ Y_B \\ X_C \\ Y_C \\ X_D \\ Y_D \end{pmatrix} \quad (11)$$

Die Lösung des LGS ergibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen allen Objekt- und Bildkoordinaten. Mit den oben stehenden Formeln ist es möglich, jedem Pixel aus dem Bildkoordinatensystem seine maßstäblich korrekte Objektkoordinate mit Längeneinheit zuzuordnen. Die Informationen Breite, Höhe und Position können aus dem entzerrten Foto extrahiert werden. Die beschriebene mathematische Operation heißt projektive Transformation und bildet zweidimensionale Koordinaten aus der Bild- in die Objektebene oder umgekehrt ab. Die Abbildung ist bijektiv und damit umkehrbar, weil sie den Zusammenhang zwischen je einem Bildpunkt und genau einem entsprechenden Objektpunkt beschreibt.

Die Positionen der Pixel-Grauwerte aus dem verzerrten Bild werden zur Entzerrung verschoben, die Koordinaten werden verändert. Da die Objektkoordinaten in der reellen Ebene  $\mathbb{R}^2$  vorliegen, die Bildkoordinaten aufgrund des Kamerachips jedoch diskret sind, müssen die transformierten Bildkoordinaten  $\tilde{\xi}, \tilde{\eta}$  interpoliert werden. Die berechneten, reellen Werte werden als natürliche Zahlen dargestellt, um sie in der Bildebene einer Position auf dem Chip zuordnen zu können. Dies geschieht am einfachsten durch Auf- oder Abrunden zur nächsten positiven Ganzzahl, welches als Interpolation 0-ten Grades verstanden werden kann. Eine höhere Genauigkeit kann durch Polynominterpolation höheren Grades erreicht werden (Kapitel 4.3.7).

### 3.4 Sensorik zur Kalibrierung

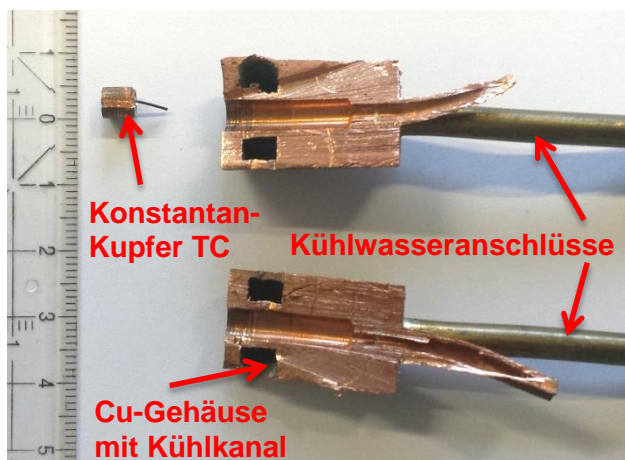
Die Berechnung einer Strahlungsflussdichtematrix aus einem Grauwertbild erfordert einen einheitenbehafteten Skalierfaktor (Gain), um die 256 dimensionslosen Pixelwerte als Flussdichte in  $\text{W/m}^2$  darstellen zu können. Dazu können verschiedene Sensoren genutzt werden, deren Messwert innerhalb der Bildmatrix ausgelesen wird. Abbildung 21 zeigt ein Radiometer vom Typ Gardon, welches in einem diffus reflektierenden Target eingebracht ist. Nach dem Einmessen, d. h. dem Markieren der vier Passpunkte, wird außerdem die Gardon-Position im Bildkoordinatensystem markiert. Nach Erhalt des Messwertes wird das Target so verfahren, dass die Kamera das Radiometer nicht mehr sieht, sondern nur einen Ausschnitt der weißen Oberfläche. Die Passpunkte und die Sensorposition sind in der Bildmatrix weiterhin bekannt, so dass sowohl die



Bildentzerrung als auch die Ermittlung des Gain in diesem Bildausschnitt möglich sind. Die für FMAS gewählte Vorgehensweise zur Bild-Kalibrierung mit Hilfe eines Flussdichtesensors wird in Kapitel 4.3.7 im Detail erläutert.

### 3.4.1 Radiometrie

In diesem Abschnitt werden zwei verschiedene Radiometer vorgestellt, die sich für hohe Strahlungsintensitäten eignen und daher im DLR zur Messung hochkonzentrierter Solarstrahlung genutzt werden. Das älteste verwendete Messprinzip ist nach seinem Erfinder Robert Gardon benannt, der sein Verfahren 1952 veröffentlicht hat [12]. Er beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise des Radiometers und stellt Ergebnisse aus Prototypmessungen gegenüber.

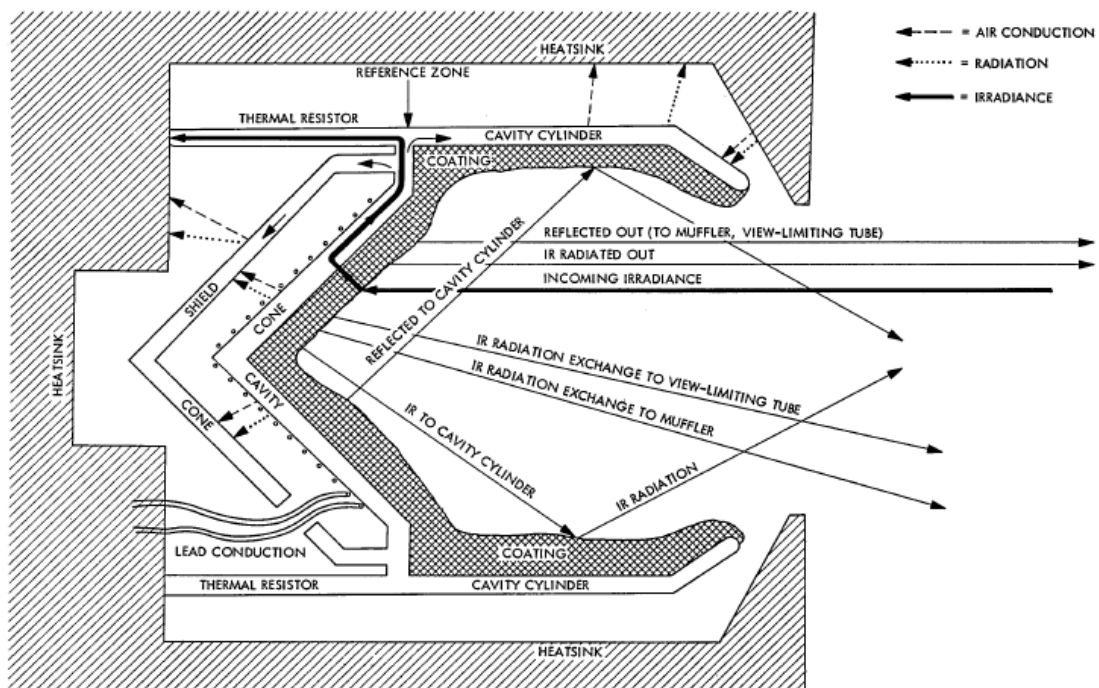


**Abb. 22:** Radiometer Gardon (Schnitt)

Während der letzten Jahre haben sich neben Gardon auch weitere Bezeichnungen für das Flussdichtemessgerät ergeben, darunter auch der beim DLR übliche Name Hycal. Abbildung 22 zeigt den prinzipiellen Aufbau anhand eines aufgetrennten, defekten Exemplars. Ein wassergekühltes Kupfergehäuse dient der Strahlungsenergie als Wärmesenke und begünstigt aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit einen schnellen Abtransport. Das Hycal zeichnet sich durch eine kurze Reaktionszeit von nur einigen Sekunden aus. Rechts im Bild sind die beiden Kühlwasseranschlüsse aus Messing (Kupfer-Zink-Legierung) zu erkennen, die den Kühlmittelfluss durch den Kupferblock ermöglichen. Die Vorderseite des Geräts ist mit einer dünnen Folie aus Konstantan (Kupfer-Nickel-Mangan-Legierung), welche sich durch einen annähernd temperaturunabhängigen elektrischen Widerstand auszeichnet. Die gesamte Radiometerfront ist mattschwarz lackiert, um die einfallende Strahlung möglichst komplett zu absorbieren. Die Verbindung der Folie mit einem Kupferdraht auf der Innenseite des Sensors stellt ein Thermoelement (TC – Thermocouple) dar, weil die Temperaturdifferenz zwischen der bestrahlten und somit erhitzten Konstantan-Folie und dem gekühlten Kupferdraht eine Seebeck-Spannung zur Folge hat. Diese Spannung im mV-Bereich wird mit einem Kalibrierfaktor multipliziert, um daraus den Wert der Strahlungsflussdichte zu berechnen. Der Kalibrierfaktor wird in einem speziellen Messaufbau unter Bestrahlung mit einer

definierten Quelle in definiertem Abstand zum Sensor, meist durch den Hersteller, ermittelt. Eine Abnutzung der mattschwarzen Schicht über die Dauer der Nutzung führt häufig dazu, dass weniger Strahlungsenergie absorbiert wird. Daraus folgt eine kleinere Temperaturdifferenz zwischen Folie und Draht und damit auch zu einer geringeren Seebeck-Spannung und Strahlungsflussdichte. Der Kalibrierfaktor muss in diesem Falle erneut ermittelt werden. Beim DLR-Institut für Solarforschung wird diese Kalibrierung durch Vergleichsmessung mit einem weiteren Radiometer vom Typ Kendall durchgeführt.

Das Kendall-Radiometer ist nach seinem Erfinder J. M. Kendall, Sr. benannt. Seine Veröffentlichung [13] erschien 1970 und beschreibt die Besonderheiten dieses Sensors, der die zu messende Strahlung in einem Hohlraum (engl. cavity) hinter einer wenige Millimeter großen Blendenöffnung einfängt und die Wärme mittels einer Thermosäule mit sehr geringem Gesamtfehler quantifiziert.



**Abb. 23:** Wärmetransfer im Kendall-Radiometer

Abbildung 23 zeigt den konisch nach hinten zulaufenden Hohlraum und den um den Konus gewickelten Heizdraht. Die „Cavity“ ist innen ebenso wie die Konstantan-Folie beim Hycal mit einer Beschichtung mit hohem Absorptionsgrad versehen, um möglichst die gesamte einfallende Strahlungsenergie aufnehmen und in Wärme umwandeln zu können. Die tatsächlichen Absorptionsgrade liegen zwischen 0,9 und 1, weil ein ideales schwarz (1) technisch (noch) nicht herstellbar ist. Der die „Cavity“ umgebende Blendenkörper wird wassergekühlt und dient als Wärmesenke und Referenztemperatur für die Thermosäule. Die Seebeck-Spannungen mehrerer in Reihe geschalteten Thermoelemente, die parallel zur Strahlung angeordnet sind, addieren sich dabei zur Thermosäulenspannung, die ihrerseits das eigentliche Sensorsignal darstellt.

Als Besonderheit bietet das Kendall-Radiometer eine interne Kalibriereinrichtung, wobei ein Heizdraht den Hohlraum mit einer definierten elektrischen Leistung erwärmt und die Thermosäulenspannung mit dieser Leistung in ein Verhältnis gesetzt werden kann. Die Kenntnis der Blendenöffnung, des Absorptionsgrades der Hohlraumbeschichtung und des von Kendall bestimmten Gesamtfehlers ermöglicht die Bestimmung des Kalibrierfaktors  $K_F$  für das beim DLR verwendete Kendall Mk IX gemäß folgender Formel:

$$K_F \left[ \frac{W}{m^2 \cdot V} \right] = \frac{U_H[V] \cdot I_H[A]}{U_{Th}[V] - U_0[V]} \cdot \frac{C_F}{m^2} \quad (12)$$

Die Offsetspannung  $U_0$  im ungeheizten Zustand liegt beim Kendall Mk IX im einstelligen  $\mu V$ -Bereich.  $U_H$  und  $I_H$  sind Spannung und Strom am Heizdraht,  $U_{Th}$  bezeichnet die Spannung an der Thermosäule. Das Messgerät Kendall Mk IX ist für Strahlungsflussdichten bis  $10 \text{ MW/m}^2$  ausgelegt und der Korrekturfaktor wird im Datenblatt des Herstellers mit  $C_F = 334100 \text{ m}^{-1}$  angegeben. Dieser lässt sich aus den Gerätekosten  $A$ ,  $a$  und  $R$  wie folgt ermitteln:

$$C_F \left[ \frac{1}{m^2} \right] = \frac{1}{A \cdot a \cdot R} \quad (13)$$

Hierbei bezeichnet  $A = 0,02966 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  die durchlässige Fläche der Blende mit einem Durchmesser von etwa 1,9 mm,  $a = 0,992$  den Absorptionsgrad der mattschwarzen Beschichtung in der „Cavity“ und  $R = 1,003$  steht für den Messfehler aufgrund sonstiger Sensoreigenschaften. Trägt man den Kalibrierfaktor über der Thermosäulenspannung auf, so ergibt sich eine annähernd lineare Funktion. Deren Steigung  $m$  und y-Achsenabschnitt  $b$  zeigen zudem eine Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur  $T_k$ , welche ebenfalls gut in linearer Näherung beschrieben werden kann. Allgemein lässt sich die Strahlungsflussdichte  $E$  wie folgt aus dem Sensorsignal  $U_{Th}$  berechnen:

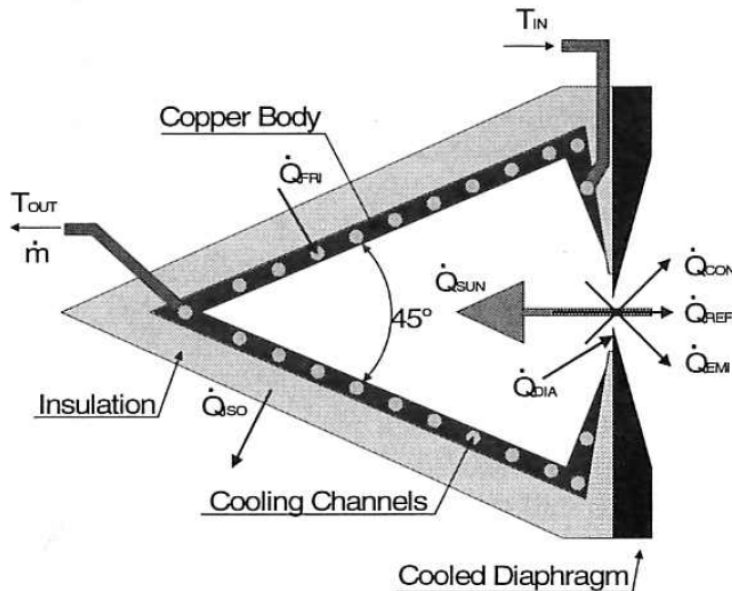
$$E = U_{Th} \cdot K_F(U_{Th}, T_k) = U_{Th} \cdot [m(T_k) \cdot U_{Th} + b(T_k)] \quad (14)$$

Die Ansprechzeit des Radiometers vom Typ Kendall ist aufgrund der größeren zu erwärmenden Empfängerfläche im Hohlraum größer als die der Gardon-Sensoren, die Messgenauigkeit ist jedoch höher. In seinem Paper nennt der Erfinder Kendall einen Gesamtfehler von 0,3 % bei konstanter Kühlwassertemperatur [13], wohingegen Gardons Prototypen bis zu 0,7 % Abweichung zeigten.

### 3.4.2 Kalorimetrie

Ein auf dem kalorimetrischen Prinzip beruhendes Messgerät wird als Kalorimeter bezeichnet. Dieses Prinzip baut auf dem Satz der Energieerhaltung, im speziellen auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, auf. Dieser besagt, dass die innere Ener-

gie eines thermodynamischen Systems ausschließlich über Volumenänderungsarbeit oder Wärmestrom über die Systemgrenzen hinweg transportiert werden kann. Eine transportierte und somit zeitlich veränderliche Wärmemenge  $\dot{Q}$  wird auch als Wärmestrom bezeichnet. Die Erhaltung der Wärme(-Energie) in einem System wird durch die Bilanzgleichung beschrieben, in der alle Wärmeströme, die das System verlassen, denen gegenübergestellt werden, die in das System hineinführen (Bilanzhülle  $\sum \dot{Q} = 0$ ).



**Abb. 24:** Kalorimeter SUNCATCH [14]

Um die großen Flussdichten hochkonzentrierter Solarstrahlung kalorimetrisch zu bestimmen, wurde im DLR-Institut für Solarforschung ein Kalorimeter mit dem Namen SUNCATCH konstruiert und mittlerweile in der zweiten Generation gebaut. Abbildung 24 zeigt die Prinzip-Skizze mit den ein- und austretenden Wärmeströmen des Sensors. Grundsätzlich lässt sich der Wärmestrom im Kühlwasser durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (15)$$

Der Energietransport erfolgt von einem mattschwarzen Kupferkonus, in den Strahlung durch eine Blende einfällt, hin zum Kühlwasser, welches durch Kanäle im Kupferkonus fließt. Die Temperaturabhängigkeiten der Dichte  $\rho(\bar{T})$  und der Wärmekapazität  $c_p(\bar{T})$  des Kühlwassers werden darüber hinaus bei der Bilanzierung des SUNCATCH zur Erhöhung der Messgenauigkeit berücksichtigt. Als Argument dient die mittlere Temperatur von ein- und austretendem Kühlwasser  $\bar{T}$ . Der Volumenstrom und die Kühlwassertemperaturen werden messtechnisch erfasst.

Wie in Abbildung 24 durch Pfeile angedeutet, unterliegt das Messgerät einigen Verlustmechanismen, die bei der Bestimmung von  $\dot{Q}_{SUN}$  zu berücksichtigen sind. Die Wärmebilanz für das SUNCATCH stellt sich wie folgt dar:

$$\dot{Q}_{SUN} = \dot{Q}_{OUT} - \dot{Q}_{IN} + \dot{Q}_{REF} + \dot{Q}_{CON} + \dot{Q}_{EMI} + \dot{Q}_{ISO} + \dot{Q}_{DIA} - \dot{Q}_{FRI} \quad (16)$$

mit den Wärmeströmen des Kühlwassers (OUT und IN), den Verlusten aufgrund von Reflektion (REF), Konvektion (CON) und Emission durch die Blendeöffnung (EMI), dem Wärmeleitungsverlust durch die Isolierung (ISO), dem Absorptionsverlust an der gekühlten Blende (DIA) und dem Einfluss der Kühlwasserreibung an den Kanalwänden (FRI). Die Strahlungsflussdichte  $E$  lässt sich durch Division des Wärmestroms  $\dot{Q}_{SUN}$  mit der Fläche der Blendenöffnung (Abb. 24, rechts) berechnen:

$$E = \frac{4 \cdot \dot{Q}_{SUN}}{\pi \cdot d_{Blende}^2} \quad (17)$$

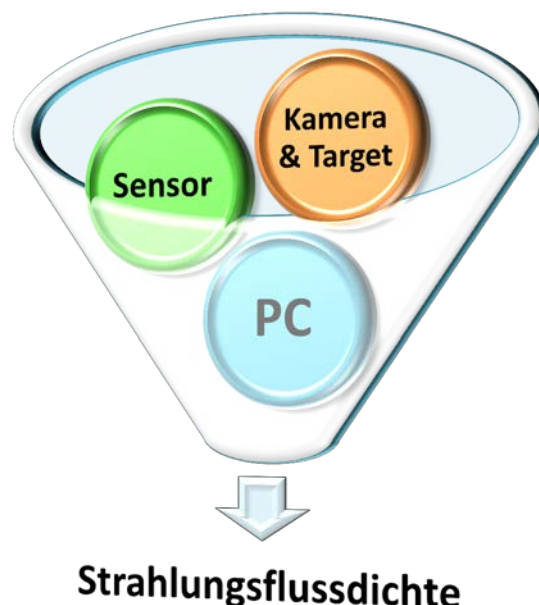
Das Kalorimeter SUNCATCH basiert zwar auf einem anderen Messprinzip als das Kendall-Radiometer, wegen des ähnlichen Aufbaus mit absorbierenden Kupferkonus und Eintrittsblende zeigt sich jedoch eine ähnlich große Ansprechzeit verglichen mit den Gardon-Radiometern. Der berechnete Fehler des SUNCATCH liegt zwischen den beiden in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Sensoren mit  $\pm 0,5 \%$  vom Messwert [14].

## 4 Entwicklung des Messsystems FMAS

Aufbauend auf den zuvor behandelten Grundlagen zur optischen Strahlung und deren Messung anhand bildgebender Verfahren, wird in den folgenden Kapiteln die Entwicklung des Messsystems FMAS schrittweise beschrieben. Für die gemeinsam mit dem DLR entwickelten Anforderungen werden die benötigten Komponenten zur Bildmessung ausgewählt und anschließend in das Messsystem eingebunden. Dies geschieht durch Programmierung einer Bedienoberfläche (GUI – Graphical User Interface) mit Hilfe der Umgebung LabVIEW von der Firma National Instruments. Schließlich wird das Messsystem anhand hochkonzentrierter Solarstrahlung im Sonnenofen sowie im Hochleistungsstrahler des DLR getestet und zur Validierung mit dem vorhandenen Messsystem FATMES verglichen.

### 4.1 Anforderungen

FMAS dient hauptsächlich der Messung des optischen Flusses unter Zuhilfenahme einer Kamera und eines Sensors (Abb. 21). Während die Kamera eine Grauwertmatrix ausgibt, liefert der Sensor ein elektrisches Signal, welches in die Strahlungsflussdichte an der Sensorposition umgerechnet werden kann. Als dritte Komponente benötigt das Messsystem schließlich einen PC, der die Signale von Kamera und Sensor verarbeitet und die Korrekturalgorithmen ausführt (Abb. 25).



**Abb. 25:** Hauptkomponenten von FMAS

Zusammen mit der für Sonnenofen und Hochleistungsstrahler zuständigen Abteilung des DLR-Instituts für Solarforschung werden für das neue Messsystem dazu folgende

Anforderungen festgelegt, welche die Software zur Ermittlung der Strahlungsflussdichteverteilung auf einem ebenen, diffus reflektierenden Target zu erfüllen hat:

- Fluss-Darstellung als 3D-Graph ( $x = \text{Breite [cm]}$  |  $y = \text{Höhe [cm]}$  |  $z = \text{Fluss [kW/m}^2\text{]}$ )
- Fluss-Darstellung in den Seitenansichten und der Draufsicht
- Festlegung eines interessierenden Bildausschnittes (Apertur)
  - kreisförmig, rechteckig oder quadratisch
- Korrektur des projektiven Fehlers (Entzerrung)
- Korrektur von Pixelfehlern, Dunkelstrom und Shading
- Berechnung der Gesamtleistung auf dem Target und auf der Apertur
- Berechnung des Schwerpunktes der Flussdichteverteilung
- Aufnahme von Fotos (z. B. für Shading- und Dunkelbilder)
- Möglichkeit zur nachträglichen Auswertung von Rohbildern
- Online-Kalibrierung mit Sensor (Gain aus Signal berechnen)
- Offline-Kalibrierung ohne Sensor (Gain aus Tabelle)
- Speichern aller relevanten Messdaten als Bitmap- und Textdateien (CSV)

In den Abschnitten unter Kapitel 4.3 werden diese Anforderungen für die Beschreibung der Softwareprogrammierung essentiell sein. Davor werden im nächsten Kapitel die ausgewählten FMAS-Komponenten wie Kamera und Filter erläutert, die zur Erfüllung der Anforderungen ebenso entscheidend sind.

## 4.2 Hardware

Als Peripherie sind neben der Hauptkomponente Kamera auch passende Objektive, Filter und Elektronik auszuwählen. Die in Kapitel 3.4 beschriebenen Sensoren stehen beim DLR zur Verfügung und sollen in das neue Messsystem integriert werden. Die vorhandenen Radiometer der Bauarten Gardon und Kendall sowie das Kalorimeter SUNCATCH werden für FMAS ebenso wie die diffusen Targets übernommen. Als PC mit der bild- und signalverarbeitenden Software soll später jeder handelsübliche Rechner oder Laptop auf dem Stand der Technik dienen können. Die Programmierung wird auf einem PC mit dem Betriebssystem Windows 7 Professional durchgeführt. Ein im Sonnenofen vorhandenes Filterrad wird zudem in die neue Struktur eingebunden (Kapitel 4.2.2). Die nächsten Abschnitte beschreiben die ausgewählten Hardwarekomponenten und deren Verwendung in FMAS.

### 4.2.1 Kamera und Zubehör

Für FMAS wird eine neue Kamera mit entsprechender Optik die von FATMES verwendete Hardware ersetzen, um die Bildauflösung zu verbessern und die Schnittstellenkompatibilität zu gewährleisten. Die Basler AG liefert mit der Kamera piA1000-48gm

aus der pilot-Reihe eine monochrome CCD-Kamera mit der Gigabit-Ethernet-basierten Schnittstelle GigE Vision (Anhang A1). Diese erlaubt die Nutzung herkömmlicher Netzkabel mit geringen Verlusten und hohen Datenraten. Die Grauwerte der quadratischen 1004 x 1004 großen Pixelmatrix des CCD-Chips werden mit bis zu 12 Bit aufgelöst, was einem Wertebereich von 0 bis 4095 ( $2^{12}$ ) entspricht. Eine Fotodiode (Pixel) auf dem CCD-Sensor weist eine Seitenlänge von 7,4  $\mu\text{m}$  auf und die maximale Abtastrate beträgt 48 Bilder pro Sekunde (fps – frames per second).



**Abb. 26:** Messkamera Basler piA1000-48gm [15]

Das C-Mount-Gewinde ermöglicht die Montage verschiedener Objektive für unterschiedliche Anwendungen. Ein quadratischer Chip ist für die Messung von konzentrierter, optischer Strahlung vorteilhaft, da meist ein symmetrisches Flussdichteprofil betrachtet wird. Bei einem inhomogen ausgeleuchteten CCD-Sensor kann es zwischen stark unterschiedlich bestrahlten Pixeln zu Fehlern bei der Ladungsverschiebung kommen (Abb. 16). Die elektrische Ladung einer dunklen Fotodiode wird aufgrund einer deutlich helleren, benachbarten Fotodiode erhöht und liefert einen zu großen Grauwert. Der quadratische Sensor wird von der symmetrischen Strahlung homogener ausgeleuchtet, wodurch dieser Messfehler reduziert wird.

Die gewählte Kamera piA1000-48gm verfügt zudem über den Chip KAI-1020 mit hoher Linearität über den gesamten Grauwertbereich. Die elektrische Ladung einer Fotodiode ist proportional der umgesetzten Photonenanzahl, so dass die ausgegebene Grauwertmatrix der tatsächlichen Strahlungsverteilung auf dem CCD-Sensor entspricht.

Der Sensor KAI-1020 ist sensitiv für Wellenlängen zwischen 300 nm bis 1000 nm. Die Intensitätsverteilung der zu beurteilenden Strahlung ist jedoch für alle enthaltenen Wellenlängen (Abb. 5) gleich, so dass diese Einschränkung nicht zu Messfehlern führt. Die zur Kalibrierung verwendeten Sensoren (Kapitel 3.4) müssen allerdings die entsprechende spektrale Empfindlichkeit aufweisen.

In den Großanlagen SOF und HLS soll jeweils eine fest installierte FMAS-Kamera eingesetzt werden. Darüber hinaus wird es eine mobile Kamera geben, die außerhalb der Anlagen mit einem Notebook verwendet werden kann. Im Sonnenofen wird die Kamera piA1000-48gm in Kombination mit dem vorhandenen Filterrad und dem darauf montierten Objektiv Nikon AF NIKKOR mit einer zwischen 24 mm und 50 mm einstellbaren Brennweite zur Einstellung des Abbildungsmaßstabes (Zoom) und der Bildschärfe eingesetzt (Anhang A2). Die diskret einstellbare Blende des Objektivs wird auf 3,3 fixiert, weil die Strahlungsintensität auf dem CCD-Chip allein durch das Filterrad mit verschiedenen Neutraldichtefilterkombinationen reguliert wird. Für den Hochleistungsstrahler

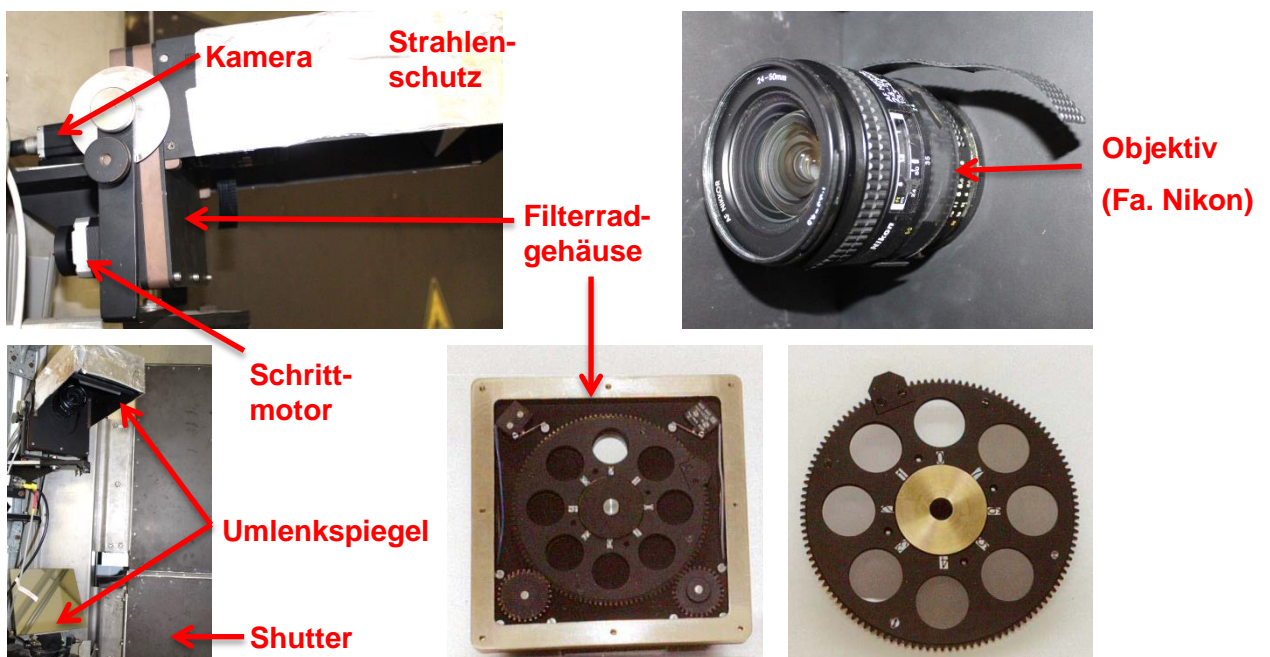


und die mobile Anwendung von FMAS wird die gleiche Kamera mit dem Objektiv Schneider APO-XENOPLAN 2.0/20-0003 (Anhang A3) genutzt, welches den Einfluss des White Shading minimiert. Die erforderlichen ND-Filter werden aufgrund des nicht vorhandenen Filterrades manuell vor dem Objektiv eingeschraubt. Für die Messung konzentrierter Solarstrahlung im HLS hat sich eine Neutraldichte von  $x = 5,7$  als sinnvoll herausgestellt. Dies entspricht gemäß Formel (3) einer Transmission von  $\tau = 0,0002 \%$ . Diese Neutraldichte ergibt sich, indem drei einzelne Filter in der Reihenfolge ND3, ND1,8 und ND0,9 von vorne nach hinten vor dem Objektiv angebracht werden. Den stärksten Filter in Richtung Objektebene der Strahlung zuerst auszusetzen, verringert den Fehler durch Doppelreflektionen zwischen den Filtergläsern, da die Intensität dadurch in größtmöglichem Maße abgeschwächt wird.



**Abb. 27:** Kamera mit Objektiv und ND-Filtern (HLS)

Die Kamera befindet sich im Hochleistungsstrahler zwischen zwei Reflektoren, so dass der Winkel zur optischen Achse der Strahlung auf dem Target gering ist (Abb. 27, links). Rechts ist das Schneider-Objektiv zu erkennen, welches über den standardisierten C-mount-Gewindeanschluss vor dem CCD-Sensor angebracht wird. Davor werden über einen Adapterring die drei ND-Filter wie oben beschrieben montiert.



**Abb. 28:** Filterrad-Kamera (SOF)

Die Kamera im Sonnenofen wird aufgrund des Strahlengangs vom Heliostaten über den Konzentrator zum Experiment (Abb. 3) innerhalb des Labors installiert. Die Position neben dem Shutter zeigt Abbildung 28 (unten links). Die Kamera piA1000-48gm ist mit dem Filterradgehäuse verbunden. Davor befindet sich das Objektiv unter einem Strahlenschutz. Die Sicht auf das Target in der Ebene des Experiments wird im Sonnenofen über zwei Umlenkspiegel ermöglicht. Der obere Spiegel befindet sich ebenfalls unter dem Strahlenschutz und ist um  $45^\circ$  geneigt vor dem Objektiv angebracht. Der untere Spiegel ist um seine Horizontale und um seine Vertikale drehbar, um den Sichtbereich der Kamera einstellen zu können.

Die Kameraparameter Bildtyp, Abtastrate, Verschlusszeit und Bildgröße werden mit Hilfe der kostenlosen Software pylon des Herstellers Basler festgelegt. FMAS arbeitet wie das alte System FATMES mit monochromen Grauwertbildern, weshalb als Bildtyp Mono8 festgelegt wird. Dies entspricht einem Grauwertbereich von 8 Bit oder den Grauwerten 0 bis 255. Die maximale Abtastrate von 48 fps wird nicht ausgenutzt. Stattdessen beträgt dieser Parameter 40 fps, um die Störanfälligkeit aufgrund anderer Lichtquellen (Leuchtstoffröhren) im 50-Hz-Gebäudestromnetz zu reduzieren. Die Verschlusszeit, welche der Belichtungsdauer des CCD-Sensors entspricht, ist klein gewählt, um Bildunschärfe zu vermeiden. Dieser Wert wird als Kehrwert in Sekunden angegeben und beträgt für FMAS 200. Der Chip wird 5 ms ( $1/200$  Sekunden) der Strahlung ausgesetzt, bevor die Ladungen der Fotodioden ausgelesen werden. Die maximale Bildgröße von  $1004 \times 1004$  wird zudem auf  $1000 \times 1000$  verringert, die beiden äußeren Pixelrahmen des CCD-Sensors fließen somit nicht in das Messsignal ein.

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben werden mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel Shadingbilder für die Varianten mit Nikon- und Schneider-Objektiv aufgenommen, um die Korrekturmechanismen mittels Software durchführen zu können.

Für das Schneider-Objektiv APO-XENOPLAN 2.0/20-0003 werden Shadingbilder für alle sieben Blendenöffnungen von  $f/2$  bis  $f/16$  hinterlegt, da diese im Betrieb variiert werden (Abb. 29). Das Shadingbild der Blende  $f/3,3$  in Abbildung 29 unten rechts ist mit dem Filterrad des Sonnenofens und dem Nikon-Objektiv AF NIKKOR aufgenommen worden. Hier genügt ein Shadingbild, da die Blendenöffnung konstant bleibt. Alle Shadingbilder werden ohne Filter erstellt. Die Helligkeit wird über die Leistung der Glühbirne in der Ulbrichtkugel so eingestellt, dass die Aussteuerung des CCD-Chips im oberen Drittel des Grauwertbereichs liegt. Die Messergebnisse sind positiv zu bewerten, da die Shadingbilder nur einen geringen Intensitätsabfall zu den Bildrändern aufweisen. Ebenso stellen sich die Dunkelbilder beider Kamerasysteme homogen dar. Sie beinhalten nur wenige von 0 verschiedene Pixelwerte, das Maximum beträgt 3.



**Abb. 29:** Shadingbilder Basler-Kamera piA1000-48gm

#### 4.2.2 Filterrad

Das Filterrad (Abb. 28) wird im Sonnenofen mit dem Messsystem FATMES verwendet. Im Filterradgehäuse befinden sich zwei flache Zahnräder, die über Schrittmotoren mit Ritzel angetrieben werden. Beide Zahnräder haben jeweils acht Bohrungen zur Aufnahme von runden Filtergläsern. Auf der kameranahen Seite liegt das Einfachfilterrad, das mit sechs ND-Filtern und einem Blindstopfen bestückt ist. Die achte Bohrung bleibt offen. Bei dem objektivnahen Doppelfilterrad sind sechs Bohrungen mit je zwei hintereinanderliegenden ND-Filtergläsern bestückt. Ebenso wie beim Einfachfilterrad gibt es eine offene Bohrung sowie eine verschlossene. Tabelle 2 stellt die Bestückung der beiden Filterräder dar. Durch Addition der Neutraldichten von hintereinander liegenden Filtern lässt sich die gesamte optische Dichte einer Filterkombination angeben. Insgesamt ergeben sich 49 mögliche Einstellungen.

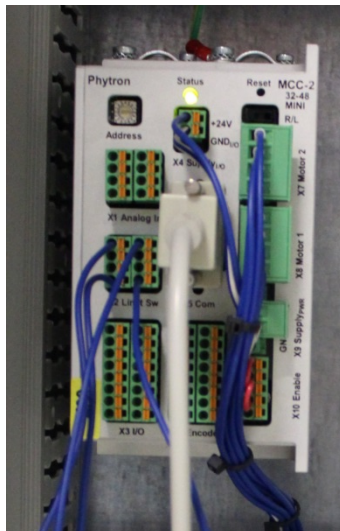
**Tab. 2:** Filterradbestückung im Sonnenofen

Position	Einfachfilterrad		Doppelfilterrad	
	Neutraldichte	Transmission	Neutraldichte	Transmission
1	0 (leer)	100 %	0 (leer)	100 %
2	0,3	50 %	3	0,1 %
3	0,4	40 %	4	0,01 %
4	0,5	32 %	5	0,001 %
5	0,6	25 %	6	0,0001 %
6	0,7	20 %	7	0,00001 %
7	0,8	16 %	8	0,000001 %
8	∞ (Stopfen)	0 %	∞ (Stopfen)	0 %

Um die Filterräder in die gewünschte Position zu drehen, ist bei FATMES ein manuelles Weiterschalten per Druckschalter erforderlich (Abb. 30, links). Über die Treiberschaltung C 10 E/A der Firma ISEL Automation (Abb. 30, rechts) werden die Spulenströme der Schrittmotoren gesteuert, um die nächste Filterposition zwischen Kamera und Objektiv einzustellen.



**Abb. 30:** Filterrad-Steuerung FATMES



Damit das Filterrad mit dem neuen System FMAS verwendet werden kann, wird diese elektrische Schaltung durch den programmierbaren Motortreiber MCC2 32-48 mini der Firma Phytron ersetzt (Abb. 31, Anhang A4). Die RS232-Schnittstelle ermöglicht die Steuerung der Schrittmotoren über die FMAS-Bedienoberfläche (Kapitel 4.3.4). Zudem werden die zwanzig Jahre alten Schrittmotoren als Maßnahme der vorbeugenden Instandhaltung durch neue Antriebe vom Typ ST4018L1804KOWI1 des Herstellers Nanotec (Anhang A5) ausgetauscht.

**Abb. 31:** Schrittmotorsteuerung Phytron MCC2 32-48 mini

Für die Verbindung des MCC2 32-48 mini mit den Schrittmotoren ist ein neues, 12-adriges Kabel erforderlich, das an eine am Filterrad montierte 25-polige Sub-D-Buchse gesteckt werden kann. Die Pinbelegung ist in Tabelle 3 dargestellt. Darin bezeichnen DFR das Doppelfilterrad und EFR das Einfachfilterrad. Beide Zahnräder verfügen außerdem über Blechfahnen am Umfang, die im Filterradgehäuse montierte Rollentaster betätigen. Der Motortreiber verfügt über Endschaltereingänge, so dass darüber eine Rückmeldung zu den aktuellen Filterpositionen zur Verfügung steht.

**Tab. 3:** Pinbelegung Schrittmotorsteuerung

Pin	Litzenfarbe	Anschluss
1	lila	DFR Spule A+
2	braun	DFR Spule A-
3	schwarz	DFR Spule B+
4	weiß	DFR Spule B-
10	rot	EFR Spule A+
11	blau	EFR Spule A-
12	grün	EFR Spule B+
13	gelb	EFR Spule B-
14	grau	DFR Endlage +
15	türkis	DFR Endlage -
24	orange	EFR Endlage +
25	rosa	EFR Endlage -

Die Programmierung des Motortreibers über die RS232-Schnittstelle und die damit verbundene erweiterte Funktionalität des Filterades gegenüber dem FATMES-System wird in den Kapiteln 4.3.4 und 4.3.6 erläutert.

### 4.3 Software

Die Steuerung des fest installierten Filterrades am Sonnenofen und das Auslesen des Kamerasignals wird über eine in LabVIEW programmierte Software realisiert. Das Programm dient neben der Signalverarbeitung als Schnittstelle für Benutzereingriffe wie die Vorgabe von Passpunkten oder der Messdatenverwaltung. Die Entstehung der Software zum Bedienen von FMAS wird in den folgenden Kapiteln nach einer Beschreibung der Programmierumgebung LabVIEW chronologisch beschrieben. Auf die Erläuterung der GUI folgt die Beschreibung der Softwarearchitektur und des gesamten Quellcodes.

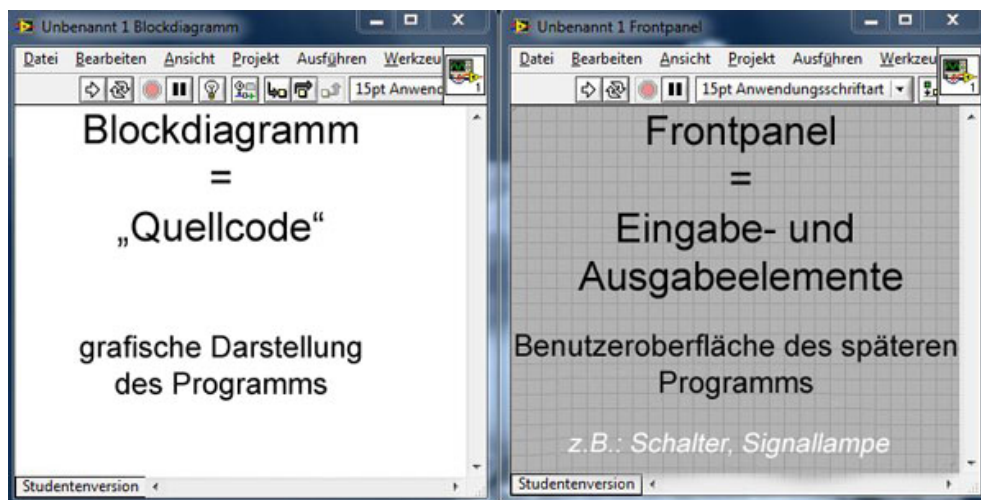
#### 4.3.1 National Instruments LabVIEW

Bereits in den 1983er Jahren begann bei dem US-amerikanischen Unternehmen National Instruments die Entwicklung der grafischen Programmierumgebung LabVIEW, die zunächst exklusiv auf Apples Macintosh verwendet werden konnte. LabVIEW steht für Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench und es wird zum größten Teil in der Automatisierungstechnik angewendet, d. h. im Wesentlichen zum Erfassen von Messsignalen, Ausgeben von Steuerungssignalen und Regeln von Zustandsgrößen in automatisierten Prozessen. Von 1986 bis heute wurde LabVIEW stetig weiterentwickelt und die Kompatibilität zu den Betriebssystemen Microsoft Windows und

Linux geschaffen. Die aktuelle und insgesamt 39. Version heißt LabVIEW 2015. Die in dieser Arbeit entwickelte Software basiert auf LabVIEW 2014 SP1.

Die grafische Programmierung von sogenannten „Virtuellen Instrumenten“ (VIs) ist als high-level-Programmiersprache zu betiteln. Bei der Kompilierung in ausführbaren Maschinencode macht der LabVIEW-Compiler einen Zwischenschritt über den weit verbreiteten, text-basierten Quellcode der Hochsprachen C / C++. Erst anschließend wird der Code in die letztendlich für die CPU des PCs verständlichen Abfolgen von Nullen und Einsen umgewandelt (kompiliert).

Bei der Programmierung werden einerseits Benutzeroberflächen (GUI – Graphical User Interface) auf dem Frontpanel und andererseits der eigentliche Programmcode auf dem Blockdiagramm entwickelt (Abb. 32). Die Codeerstellung funktioniert nach dem Datenflussmodell, in dem von links nach rechts geschaut wird. Links befinden sich Eingangsdaten und rechts Ausgangsdaten, die über das Hauptprogramm miteinander verbunden sind. Eingangsdaten werden in der Regel im Hauptprogramm verarbeitet und dienen der Generierung von Ausgangsdaten. Als einfaches Beispiel stelle man sich eine Addition zweier Zahlen vor. Eingangsdaten sind dabei die Summanden, das Hauptprogramm ist die Additionsoperation und die Ausgangsdaten beinhalten die Summe.



**Abb. 32:** Blockdiagramm (Code) und Frontpanel (GUI) [16]

Die grundlegenden Datentypen und Strukturen, die dem Programmierer in LabVIEW zur Verfügung stehen, sind dieselben wie in anderen gängigen Programmiersprachen wie C oder Visual Basic. So unterscheidet LabVIEW neben booleschen Größen (TRUE oder FALSE) zwischen vorzeichenlosen (unsigned) und vorzeichenbehafteten (signed) Zahlenwerten mit unterschiedlicher Auflösung und Genauigkeit. So stellen Daten vom Typ U8 (unsigned integer mit 8 Bit Auflösung) alle ganzen Zahlen von 0 bis 255 ( $[0, 2^8 - 1]$ ) dar und der Datentyp I32 (signed integer mit 32 Bit Auflösung) bildet ganze Zahlen des Dezimalsystems von - 2.147.483.648 bis + 2.147.483.647 ( $[- 2^{32} / 2, 2^{32} / 2 - 1]$ ) ab. Darüber hinaus bietet LabVIEW drei verschieden aufgelöste Formate für Gleitkommazahlen (32 / 64 / 128 Bit = SGL / DBL / EXT), ein Format für Texte (STRING) und be-

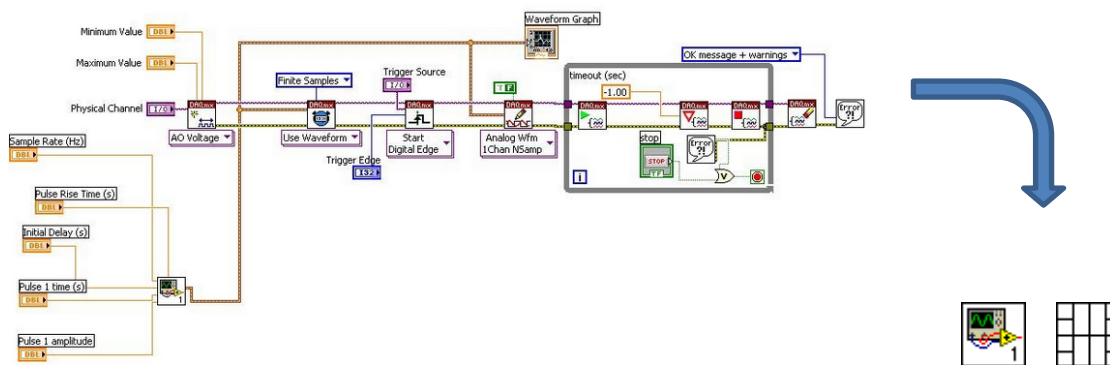


herrscht die Verarbeitung komplexer Zahlen. Mehrdimensionale Datenfelder mit Einträgen gleichen Datentyps wie Vektoren (1D), Matrizen (2D) oder Bilder (3D) werden in Arrays zusammengefasst. Ein besonderer Datentyp in LabVIEW ist das Cluster. Dieser kann als Container verstanden werden, der, anders als ein Array, Daten verschiedener Datentypen zusammenfasst (clustert). Der Vorteil von Clustern ist die verbesserte Lesbarkeit und Übersichtlichkeit des Grafik-Codes, weil die zusammengefassten Daten über eine einzelne Leitung in den Datenfluss eingebunden werden. Beispielsweise könnte ein Cluster die folgenden zwei Elemente beinhalten, die thematisch zusammengehörig sind:

- Messgröße als Fließkommazahl vom Typ DBL
- physikalische Einheit der Messgröße vom Typ STRING

Strukturen in LabVIEW sind einerseits in jeder Programmiersprache gebräuchliche Anweisungen wie FOR-, DO-LOOP-UNTIL-, DO-WHILE-Schleifen oder IF-ELSE-Unterscheidungen. LabVIEW verfügt darüber hinaus über zahlreiche, eigene Programmierstrukturen. Als Beispiel sei hierzu die Ereignisstruktur genannt, welche es ermöglicht, auf Benutzereingriffe auf dem Frontpanel programmatisch zu reagieren. Die Effizienz einer Software kann mit solch einer Struktur verbessert werden, da der Wert eines Bedienelements nur zum Zeitpunkt seiner Beeinflussung durch den Benutzer im Programm verarbeitet wird und nicht bei jeder Iteration (Schleifendurchlauf).

Unterprogramme in LabVIEW heißen Sub-VIs und dienen in erster Linie der besseren Lesbarkeit des grafischen Codes. Zusammengehörende Programmfunktionen werden darin zusammengefasst und nehmen weniger Fläche auf dem Bildschirm ein.



**Abb. 33:** Zusammenfassung von LabVIEW-Code in Sub-VIs

Abbildung 33 zeigt auf der linken Seite den Code für eine einfache Datenerfassung. Dies könnte beispielsweise die Messung zweier Thermoelemente sein. Sei die Hauptfunktion des Programms (Haupt-VI) die Messwerterfassung und -speicherung dieser zwei Temperaturen, einer Druckmessstelle und einem Durchfluss, so würde es sich anbieten, jede dieser Teilfunktionen in folgende Sub-VIs zusammen zu fassen:

- Messung der Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$
- Druckmessung von  $p$
- Erfassung des Durchflusses  $\dot{Q}$
- Zugriffsverwaltung und Schreiben in eine Messwertdatei

Die vier genannten Unterprogramme verfügen über ein Symbol, das der Programmierer frei gestalten kann und über ein Anschlussfeld. Letzteres dient der Anbindung des Sub-VIs mit den Datenleitungen des Haupt-VIs. Auch hier werden gemäß Konvention links Eingangsdaten zugeführt und rechts Ausgangsdaten weitergeleitet.

Ebenso wie vom Programmierer selbst erstellte Sub-VIs funktionieren auch die zahlreichen Funktionen, die in LabVIEW zur Verfügung stehen. Der Lese- und Schreibzugriff auf ein physikalisches Gerät (Mess- und Steuerhardware) erfolgt beispielsweise über ein von NI vorkonfiguriertes VI. Parameter wie „Zugriffsart“ (read-only / write-only / read-write) sowie Anschlussart und -kennung am PC müssen als Eingangsdaten bereitgestellt werden, um an den rechten Anschlüssen für den weiteren Programmablauf abgegriffen werden zu können. Die intern programmierte Kommunikation mit dem USB-Port des Rechners findet also innerhalb des fertigen Sub-VIs statt und muss nicht selbst implementiert werden. Die umfangreiche Bibliothek an vorgefertigten Funktions-VIs machen LabVIEW deshalb zu einem effizienten Tool für die Programmierung von Automatisierungsaufgaben.

#### 4.3.2 Benutzeroberfläche von FMAS

Das Frontpanel der FMAS-Software ist in Abbildung 34 dargestellt. Diese GUI besteht aus einer übersichtlichen Anordnung von Bedien- und Anzeigeelementen. Zentral wird das Bild aus dem abgetasteten Kamerasignal angezeigt. Je nach Auswahl können auch Standbilder oder Bilddateien von einem Datenträger gezeigt werden. Um Intensitätsunterschiede der Strahlung für den Nutzer hervorzuheben, kann anstelle des monochromen Grauwertbildes eine farbige Darstellung gewählt werden. Der Wert 0 für die Farbe Schwarz bleibt unverändert, die 255 übrigen Helligkeitswerte werden in fünfzehn gleich große Farbbereiche unterteilt. Jeweils siebzehn hintereinander folgende Grauwerte werden einer Farbe zugewiesen. Abbildung 34 zeigt ein nicht entzerrtes Rohbild eines Strahlprofils im Sonnenofen in dieser Farbdarstellung.

Das Frontpanel enthält weitere Bildinformationen, die synchron zur Bildanzeige aktualisiert werden. Unter dem Bild-Anzeigeelement werden neben der Bildgröße, dem aktuell eingestellten Zoom-Faktor und dem Bildtyp auch der maximale Grauwert und der Grauwert an der momentanen Cursor-Position dargestellt.

Rechts neben dem Kamerabild befindet sich das Histogramm, welches die Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte beinhaltet, mit dem zugehörigen Mittelwert und der Standardabweichung.

Links oben neben dem Bild bietet die GUI vier Bedienelemente zur Manipulation. Die Darstellung kann nach Betätigen einer dieser Schaltflächen vergrößert, verkleinert oder



verschoben werden. Passpunkte zur Bildentzerrung (Kapitel 3.3.5) sowie die Position des Sensors zur Kalibrierung (Kapitel 3.4) werden ebenfalls über diese Elemente bestimmt. In den Bildecken und unterhalb der Bedienelemente befinden sich blinkende Anzeigen, die auf fehlende Angaben (Passpunkte, Sensorposition) hinweisen.

Im linken Bildschirmbereich sind weitere Bedienelemente in Kategorien angeordnet, welche den Programmablauf steuern. Einige dieser Elemente sind deaktiviert und ausgegraut, um Fehlbedienung zu jedem Zeitpunkt der Ausführung auszuschließen. Die Funktionen aller Bedienelemente der Benutzeroberfläche werden in Kapitel 4.3.4 im Detail erläutert.

Die Farbgestaltung des Hintergrundes und aller Bedien- und Anzeigeelemente der GUI ist individuell und entspricht nicht dem LabVIEW-Standard (grau). Ebenso dient das DLR-Logo mit dem Schriftzug der Abteilung der Individualisierung der FMAS-Software und betont deren Herkunft.

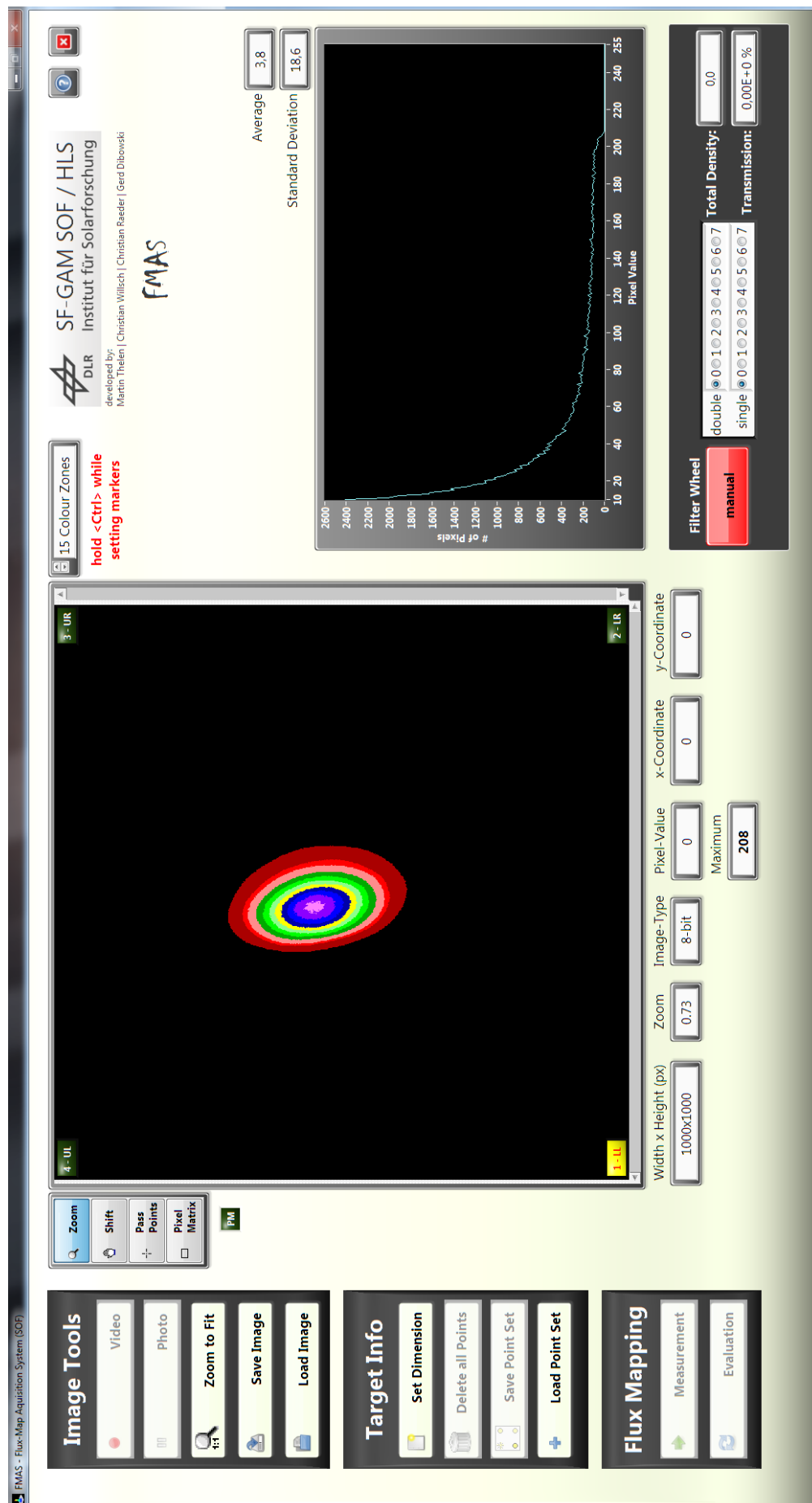
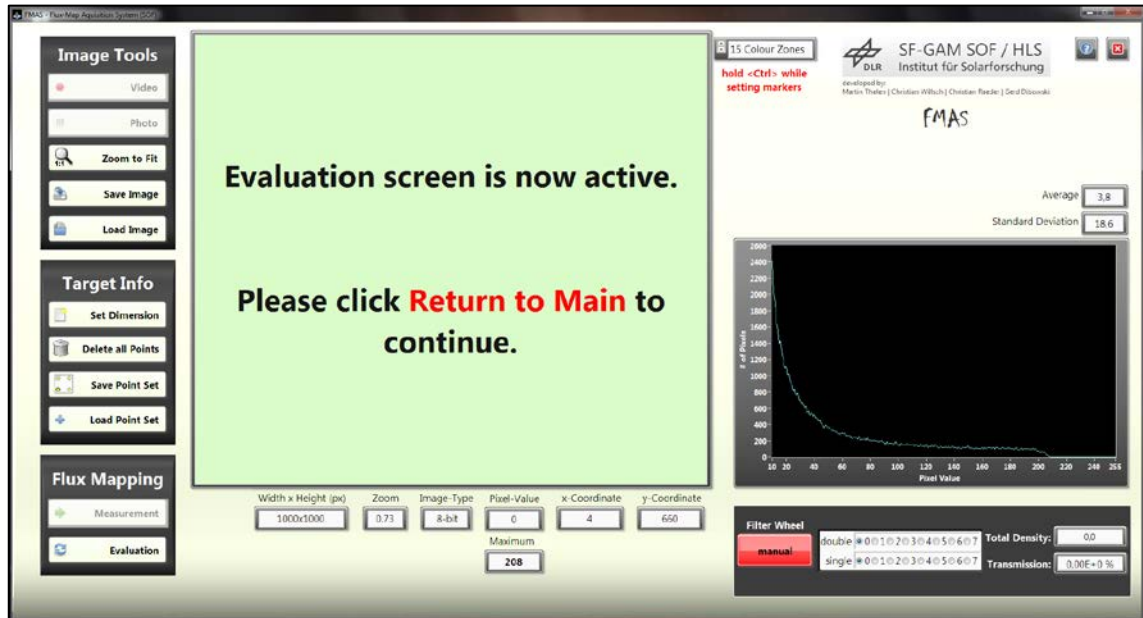


Abb. 34: FMAS – Bedienoberfläche

Die Ansicht aus Abbildung 34 weist je nach Status im Programmablauf eine geänderte Darstellung auf. Alle Schaltflächen sind in der folgenden Ansicht (Abb. 35) nicht bedienbar und dem Kamerabild wird ein Hinweis übergelagert. Der Mauszeiger wird über dem Fenster als wartend angezeigt (blauer Kreis in Windows 7).



**Abb. 35:** FMAS – Bedienoberfläche im Wartemodus

Diese Darstellung ist nach einer Bildauswertung aktiv, wenn deren Ergebnisse angezeigt werden. Dafür öffnet sich ein eigenes Frontpanel auf einem zweiten Bildschirm, mit allen für die Messung relevanten Angaben (Abb. 36). Im Ergebnisfenster lässt sich die Flussdichteverteilung wahlweise in der Draufsicht, von der Seite oder als dreidimensionaler Graph betrachten. Die Anzeige oben links beinhaltet den Namen des aktuellen Projekts und oben rechts wird das zugrundeliegende Messbild aufgeführt. Die Gesamtleistung auf dem Target und auf einer benutzerdefinierten Fläche (Apertur) können der darunterliegenden Titelzeile entnommen werden. Zudem enthält die Draufsicht die horizontale und vertikale Mittellinie des Targets (weiß gestrichelt) und die Position des Schwerpunktes der Strahlungsflussdichte (rotes Kreuz). Zwischen den Graphen zeigen fünf weitere Anzeigeelemente die Höhe der Isolinien bei unterschiedlichen Anteilen der maximalen Leistungsdichte („Peak-Flux“). Die Farbgrößen in den Graphen entsprechen diesen Werten. Im Sprachgebrauch haben sich die mathematisch nicht ganz korrekten Begriffe „x-Prozent-Radien“ für die Isolinien durchgesetzt. Der 10-Prozent-Radius bezeichnet alle Werte, welche die Isolinie bei 90 % der Maximalflussdichte enthält. Nur bei einer ideal symmetrischen Flussdichteverteilung würden diese jedoch einen Kreis bilden.

Die Berechnung der Werte für die Ergebnisdarstellung wird ausführlich in Kapitel 4.3.7 erläutert. Durch Betätigen der Schaltfläche „Return to Main“ wird das Ergebnisfenster geschlossen und die Freigabe auf die Bedienoberfläche (Abb. 34) wieder erteilt.

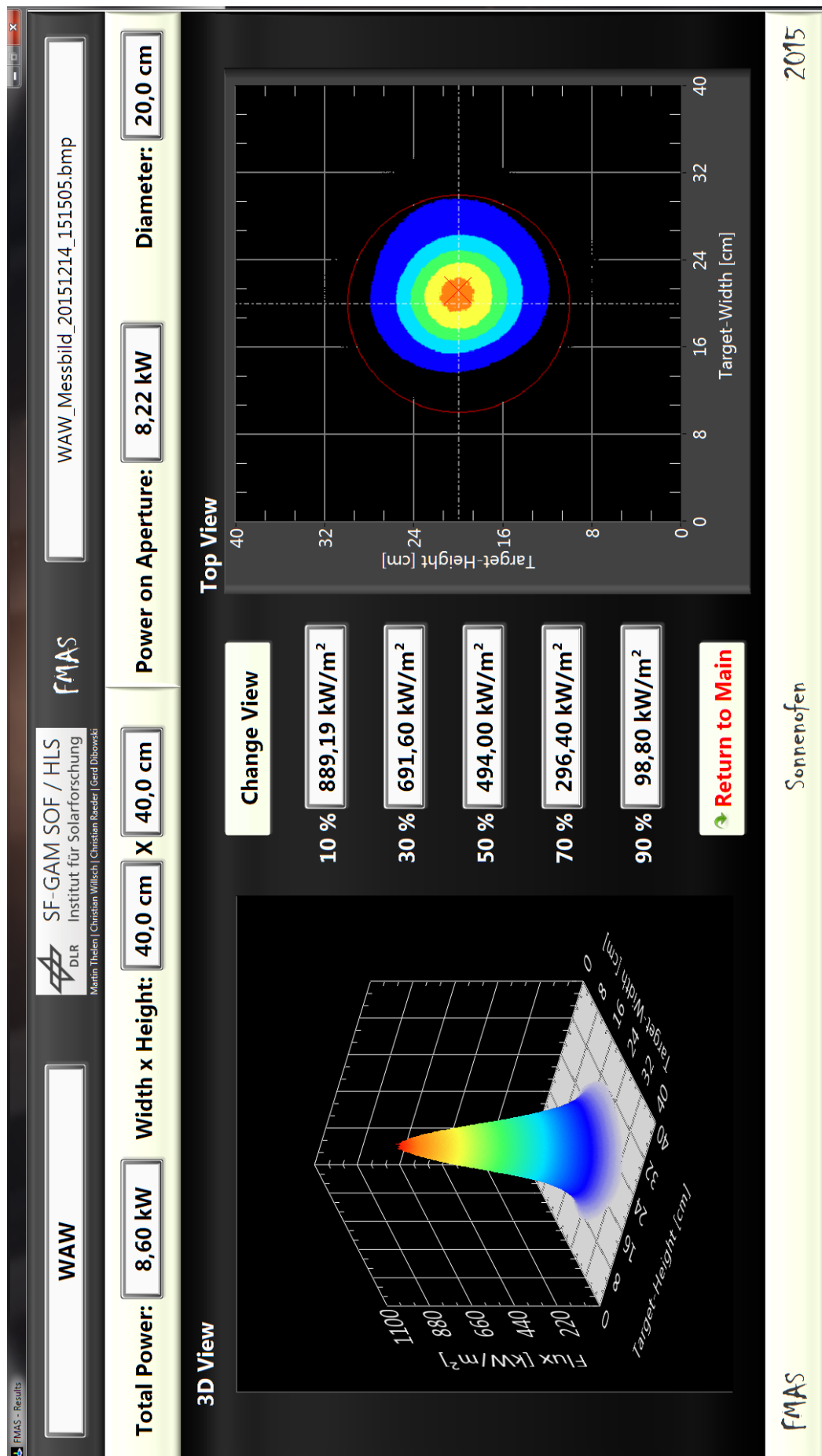


Abb. 36: FMAS – Ergebnisbildschirm

### 4.3.3 Softwarearchitektur

Die Software für FMAS wird in einem LabVIEW-Projekt organisiert. Dies ermöglicht eine übersichtliche Verwaltung aller SubVIs und weiterer für die Software relevanten Daten wie der Symbolgrafik oder benutzerdefinierten Frontpanelementen innerhalb der Datei „FMAS.lvproj“ (Abb. 37). In diesem Projekt werden insgesamt drei verschiedene Haupt-VIs verwaltet. Die Datei „FMAS.vi“ wird im HLS in Köln eingesetzt, „FMAS\_SOF\_Filtrerrad.vi“ verfügt zusätzlich über die Filtrerradsteuerung und im Programm „FMAS\_SynLight“ sind Shadingbilder des in Jülich verwendeten Kamerasystems hinterlegt. Der Ordner „SubVIs“ beinhaltet sowohl Unterprogramme, auf die alle FMAS-Versionen zugreifen als auch solche, die nur für die Sonnenofen-Version benötigt werden. Benutzerdefinierte Dialogfenster werden mit dem Präfix „Dialog\_“ im Dateinamen kenntlich gemacht, Unterprogramme mit „Sub\_“. Im Ordner „Typdefinitionen“ befinden sich drei selbst gestaltete Buttons, die anstelle der LabVIEW-Standard-Elemente auf dem Frontpanel verwendet werden. Bei Verwendung von Routinen aus der LabVIEW-Bibliothek werden im Ordner „Abhängigkeiten“ automatisch Verknüpfungen auf die erforderlichen Unterrouinen im Projekt hinterlegt.

Neben der Dateiverwaltung bietet die Projektdatei die Möglichkeit, ausführbare Dateien zu erstellen (exe – Executeable), welche auf beliebigen Computern genutzt werden können. Diese werden im Projekt-Explorer unter „Build-Spezifikationen“ abgelegt. Der Quellcode auf dem Blockdiagramm ist bei einer exe-Datei nicht sichtbar. Frontpanel und Code sind nicht editierbar.

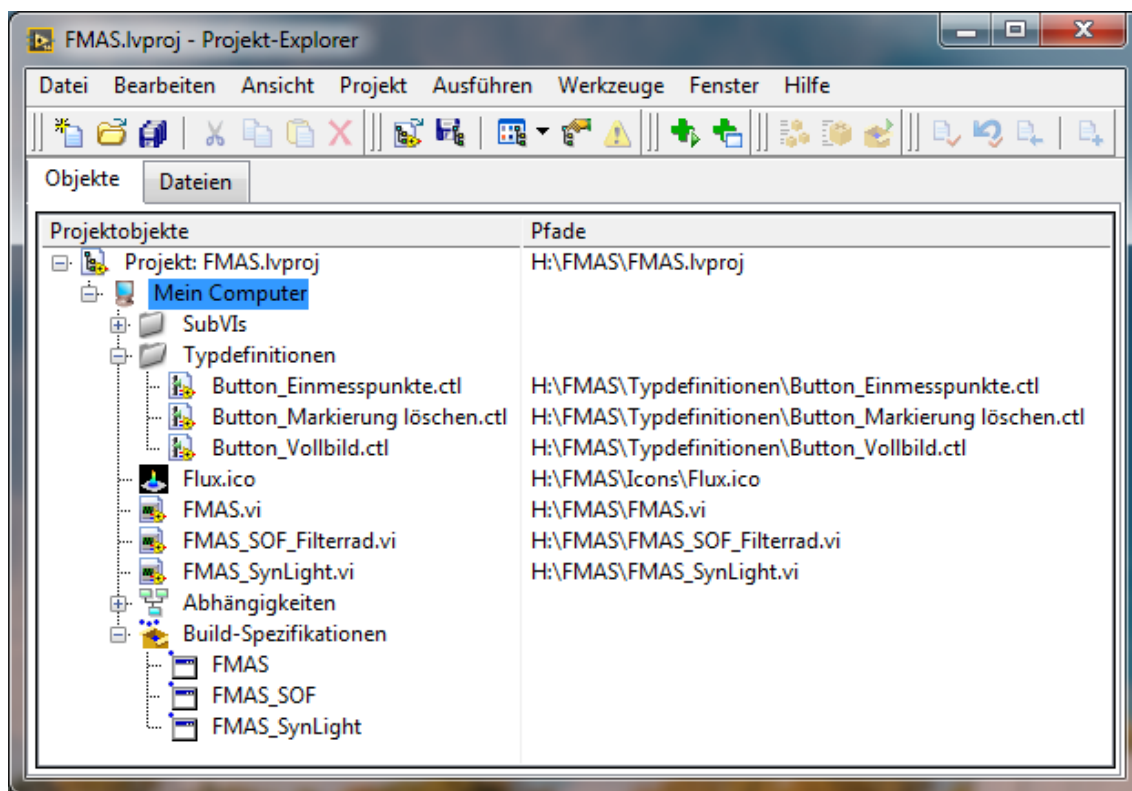
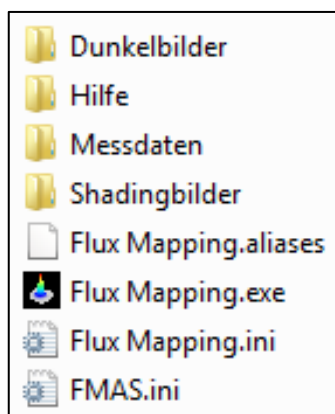


Abb. 37: Projekt-Explorer „FMAS.lvproj“

Die exe-Dateien von FMAS basieren auf LabVIEW Version 2014 (SP1) 32-bit und sind auf folgenden Betriebssystemen nutzbar. Voraussetzung sind die für das jeweilige System geeigneten Run-Time-Engines für LabVIEW (LVRTE2014) und NI Vision 2015.

- Windows Server 2003 R2 (32-bit)
- Windows XP SP3 (32-bit)
- Windows Vista (32-bit und 64-bit)
- Windows 7 (32-bit und 64-bit)
- Windows 8 (32-bit und 64-bit)

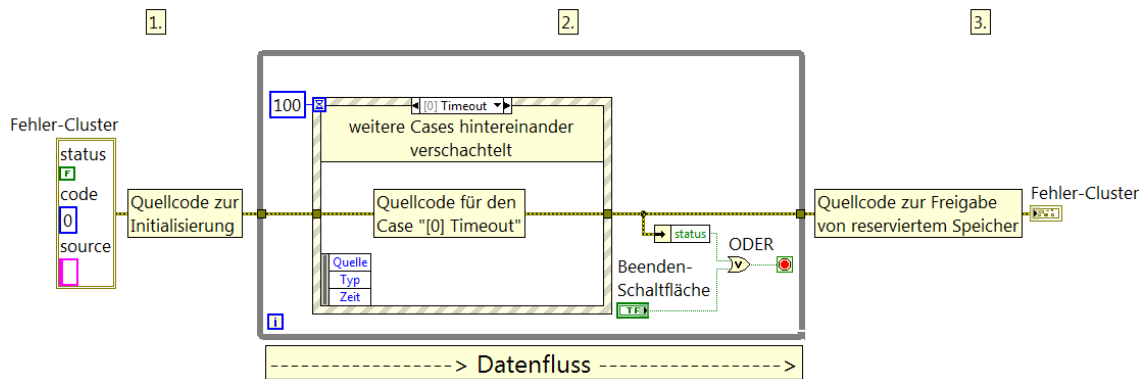
Auf der Festplatte des Computers müssen zudem die in Abbildung 38 dargestellten Dateien in einem Ordner abgelegt sein. Die Dateien „Flux Mapping.aliases“, „Flux Mapping.exe“ und „Flux Mapping.ini“ werden während des Build-Prozesses selbsttätig angelegt und sind erforderlich zur Ausführung der Software. Die Datei „FMAS.ini“ wird im Rahmen der Bildentzerrung genutzt (Kapitel 4.3.4). Das Dunkelbild und die Shadingbilder für das verwendete Kamerasystem liegen in den entsprechenden Dateiordnern. „Hilfe“ beinhaltet eine pdf-Datei, welche der Nutzer aus dem laufenden Programm heraus anzeigen lassen kann, um Hinweise zur Bedienung zu erhalten. Der Aufbau des Ordners „Messdaten“ wird in Kapitel 4.3.8 beschrieben.



**Abb. 38:** Ordnerstruktur FMAS

Der gesamte Programmablauf der FMAS-Software wird über die in Kapitel 4.3.1 erwähnte Ereignisstruktur realisiert, damit alle Teilaufgaben ressourcenschonend ausgeführt werden. Die Struktur arbeitet iterativ innerhalb einer WHILE-Schleife. Bei einem Fehler oder nach Betätigen der Schaltfläche zur Beendigung der Software endet die Schleife (fußgesteuerte Schleife). Fehler werden über ein spezielles Fehler-Cluster überwacht und mit dem Datenfluss durch alle SubVIs transportiert. Das Fehler-Cluster in LabVIEW besteht aus einem boolschen Element, einem numerischen Fehlercode (I32) und einer Fehlerbeschreibung im Datentyp STRING. Sämtliche Unterprogramme und die LabVIEW-eigenen Bausteine sind mit einem Fehlereingang und einem Fehlerausgang ausgestattet. Das Verbinden der Programmteile über dieses Cluster hat den Vorteil, dass Fehler rechtzeitig erkannt werden und entsprechend reagiert werden

kann. So werden aufwendige Berechnungen innerhalb eines Sub-VIs bei einem Fehler im vorangehenden Code nicht mehr ausgeführt, um die Software zeitnah beenden oder in einen sicheren Zustand überführen zu können. Ein weiterer Vorteil des Fehler-Clusters besteht darin, dass Teilaufgaben nicht zufällig parallel, sondern bewusst sequentiell aufgerufen werden. Ein Unterprogramm wird erst nach vollständigem Abschluss des vorherigen gestartet, falls der Fehlerausgang des einen mit dem Fehler-  
eingang des anderen verbunden ist.



**Abb. 39:** Grundgerüst des Quellcodes

Der Quellcode vor der zentralen WHILE-Schleife mit der darin befindlichen Ereignisstruktur wird einmalig beim Starten der Software ausgeführt und dient der Initialisierung aller erforderlichen Angaben (Abb. 39, links). Die Schleife startet erst dann, wenn diese Daten und das Fehler-Cluster an deren Eingangstunneln anliegen (Abb. 39, Mitte). Das Hauptprogramm beginnt somit erst nach erfolgter Initialisierung. Die Iterationsdauer der Schleife wird über den Timeout-Anschluss der Ereignisstruktur festgelegt und beträgt im oberen Beispiel 100 ms. Die Schleifenfrequenz beträgt 10 Hz. Neben dem dargestellten Timeout-Case reagiert die Struktur auch auf festgelegte Frontpanelaktivitäten wie das Betätigen der Schaltfläche zum Beenden der FMAS-Software. Der zugehörige Quellcode wird im Blockdiagramm „hinter“ den anderen Cases verschachtelt. Wird die Schleife beendet, folgt nochmals Code, der nur einmalig ausgeführt wird. Dieser dient der Freigabe von Arbeitsspeicher (RAM – Random Access Memory), welcher bei der Initialisierung reserviert und während der Programmausführung belegt wurde. Zudem wird dem Nutzer bei Programmabbruch wegen eines Fehlers eine entsprechende Meldung generiert und angezeigt (Abb. 39, rechts).

Die FMAS-Version für den Sonnenofen besitzt aufgrund der Filtrerradsteuerung gegenüber den anderen genannten Programmen für die Hochleistungsstrahler in Köln und Jülich einen erweiterten Umfang. Aus diesem Grund wird diese Version Bestandteil der weiteren Beschreibungen sein. Das in Abbildung 39 gezeigte Grundgerüst wird um eine Sender-Empfänger-Struktur ausgedehnt, welche aus zwei parallelen WHILE-Schleifen besteht. Diese Struktur wird auch Master-Slave-Entwurfsmuster genannt. Die sichere Kommunikation zwischen den Schleifen wird über die LabVIEW-Funktion „Melder“ ermöglicht und dient bei FMAS der automatischen Filtrerradeinstellung. Aus dem Timeout-Case der Hauptschleife wird der Fahrbefehl für die Filtrerradmotoren generiert

und über den Melder an die parallele Slave-Schleife gesendet. Dort wird der Fahrbefehl aus dem Melder unmittelbar nach dem Senden empfangen und weiterverarbeitet (Kapitel 4.3.6). Die Frequenz der parallelen Empfängerschleife wird durch die Senderschleife vorgegeben. Eine Iteration wird nur ausgeführt, wenn eine neue Meldung aus der getakteten Master-Schleife gesendet wird.

#### 4.3.4 Programmablauf und Funktionalität

In die WHILE-Schleife der Hauptstruktur führen insgesamt vierzehn Tunnel, deren Inhalte während der Initialisierungsphase zum Programmstart mit Daten beschrieben werden. Neun dieser Tunnel sind als Schieberegister ausgeführt und transportieren variable Daten von einer Schleifeniteration zur nächsten. Tabelle 4 dient der Erläuterung der vierzehn Tunnel.

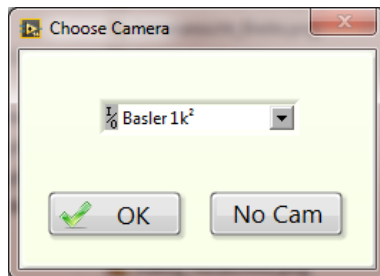
**Tab. 4:** Schleifentunnel und Schieberegister

Name	Art	Datentyp	Beschreibung
Apertur	Schieberegister	Cluster	Maße und Form der Apertur
Objektkoordinaten	Schieberegister	Array	Targetmaße für Entzerrung
Session	Schieberegister	IMAQdx	Referenz auf Kamera-Port
Kamerabild	Schieberegister	IMAQ Image	Referenz auf Kamerabild
Fehler	Schieberegister	Cluster	Fehler-Cluster im Datenfluss
Grab läuft	Schieberegister	Bool	Video oder Standbild
Projektordner	Tunnel	Pfad	Zeiger auf Projekt-Ordner
COM1 - MCC	Tunnel	VISA	Referenz auf Motortreiber
Filterdaten	Schieberegister	Cluster	Dichte und Transmission
Bildpfad	Schieberegister	Pfad	Zeiger auf eine Bilddatei
Kamera	Tunnel	STRING	Name der Kamera
Time Count	Schieberegister	I32	Takt für Filterrad
Farbkarte	Tunnel	Array	Farbgrenzen zur Darstellung
Melder	Tunnel	Cluster	Sender-Empfänger-Struktur

Sobald diese Daten vorhanden sind, beginnt die erste Iteration und somit der eigentliche Programmablauf. Während der Initialisierung wird der Mauszeiger als Wartesymbol angezeigt und die Bedienung des Frontpanels unterbunden. Nach den Fahrbefehlen an die Filterradmotoren zum Anfahren ihrer Endschalter (Rollentaster) wird die Sichtbarkeit des Hinweises für den Wartemodus (Abb. 35) als FALSE definiert. Der Hinweis ist als Text-Anzeigeelement vom Datentyp STRING realisiert und wird nur nach einer Flusssichteauswertung eingeblendet. Bei Programmstart ist das Element unsichtbar. Die Festlegung der Sichtbarkeit und weiterer Verhaltensweisen von Frontpanelementen erfolgt in LabVIEW über Eigenschaftsknoten, die wie andere Pro-



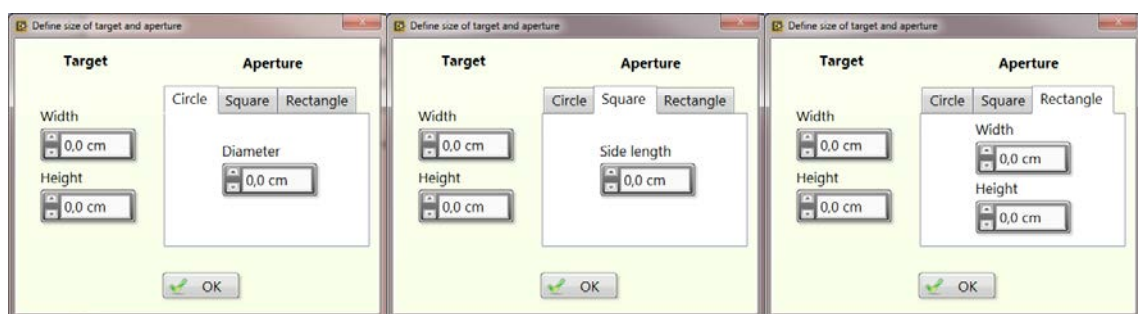
grammteile über Fehler-Cluster in den Datenfluss eingebunden werden können. Auf diese Operation folgen Dialoge, die versuchsspezifische Angaben vom Benutzer fordern. Die Auswahlliste des ersten Dialogs (Abb. 40) zeigt alle am Computer angeschlossenen Kameras an. FMAS kann auch ohne Kamera ausgeführt werden, um gespeicherte Bilddaten zu sichten oder aufgenommene Rohbilder mit geänderten Parametern auszuwerten.



**Abb. 40:** Dialog „Kameraauswahl“

In einem beliebigen Verzeichnis muss nach Quittieren dieses Fensters ein Projektordner angelegt werden. Dies kann auch ein bereits vorhandener Ordner sein. Der Auswahldialog ist in jedem Falle über die Windows-Schaltfläche „Verzeichnis auswählen“ abzuschließen.

Bevor der Programmablauf in der Hauptschleife startet, wird der Nutzer in einem weiteren Dialog zur Eingabe der Maße von Target und Apertur aufgefordert. Das Target wird als Viereck aus den Werten Höhe und Breite definiert. Die Apertur kann anforderungsgemäß (Kapitel 4.1) entweder als Quadrat, Kreis oder Rechteck angegeben werden. Abbildung 41 zeigt diese drei möglichen Ansichten des Dialogs, welcher nur mit gültigen Eingaben quittiert werden kann (Maßangaben ungleich 0).




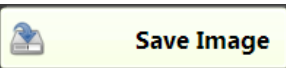
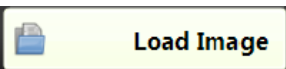

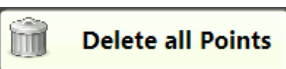
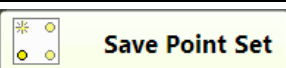

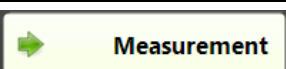
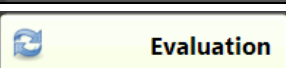








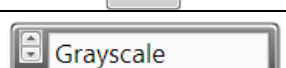




**Abb. 41:** Dialog "Target und Apertur"

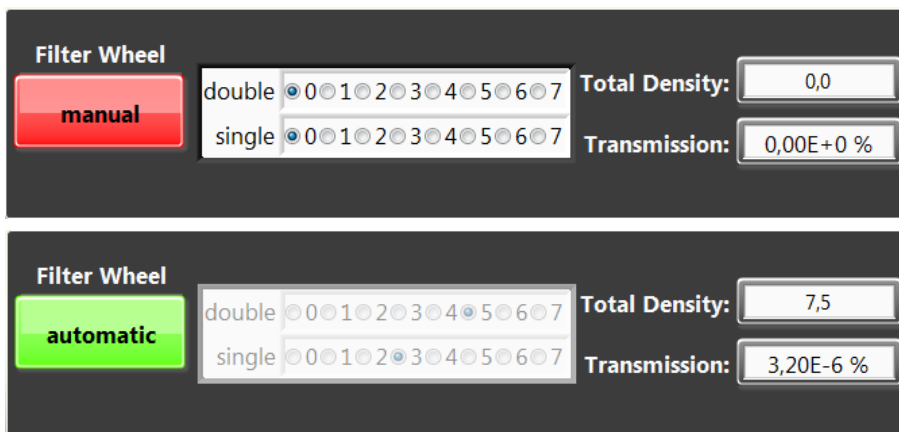
Im Quellcode folgen weitere Eigenschaftsknoten zur Bestimmung der Anfangswerte von Frontpanelementen in Abhängigkeit von den Benutzereingaben. Die Schaltflächen zur Bildmanipulation „Zoom“, „Shift“, „Pass Points“ und „Pixel Matrix“ links oben neben dem Kamerabild (Abb. 34) sind standardmäßig in LabVIEW nicht die einzigen Buttons. Per Eigenschaftsknoten werden die übrigen abgeschaltet, da FMAS lediglich diese vier Varianten benötigt. Zudem werden Markierungen im Bild grün dargestellt. Dieser Eigenschaft wird stattdessen die Farbe Rot zugewiesen.

Soll das Programm ohne Kamera (Button „No Cam“, Abb. 40) ausgeführt werden, müssen die Schaltflächen „Video“ und „Photo“ grundsätzlich deaktiviert bleiben, um Fehlbedienung und daraus resultierenden Fehlern vorzubeugen. Nach den beschriebenen Festlegungen wird der Mauszeiger auf den Standardcursor gesetzt und die Bedienung des Frontpanels freigegeben. Die Ereignisstruktur in der Hauptschleife befindet sich ab diesem Zeitpunkt im Timeout-Case und führt den darin implementierten Code mit einer Frequenz von 20 Hz aus, solange keine Schaltflächen (Tab. 5) bedient werden.

**Tab. 5:** Buttons der Bedienoberfläche

Schaltfläche	Funktion	Bemerkungen
	startet Live-Bild-Anzeige	blinkt rot, wenn aktiv
	Standbild-Anzeige	-
	stellt das gesamte Kamerabild dar	Rücksetzen des Zooms
	öffnet Dateidialog zum Speichern des aktuell dargestellten Bildes	-
	öffnet Dateidialog zum Laden eines Bildes	-
	öffnet Dialog „Target und Apertur“	Abb. 41
	löscht alle Einmesspunkte im aktuellen Bild	nur aktiv, falls min. 1 Punkt vorhanden
	speichert das aktuelle Einmessbild und die Punkte in der ini-Datei	nur aktiv, falls alle 5 Punkte vorhanden
	lädt die Einmesspunkte eines gespeicherten Bildes in das aktuelle Bild	-
	Aufnahme und Auswertung des aktuellen Bildes und anschließende Ergebnisdarstellung	nur aktiv, falls alle 5 Punkte vorhanden und Live-Bild aktiv
	Auswertung des aktuell geladenen Bildes und anschließende Ergebnisdarstellung	nur aktiv, falls alle 5 Punkte vorhanden und Live-Bild inaktiv
	Cursor erhöht oder verringert stufenweise den Zoom des Bildes um den angeklickten Bereich	ohne  : vergrößern mit  : verkleinern
	Cursor auf dem Bild kann zum Verschieben des Bildes genutzt werden	-
	Cursor setzt einen Punkt an der angeklickten Stelle oder verschiebt einen gesetzten Punkt	mehrere Markierungen mit  + Linksklick
	Zeichnet ein Rechteck, verschiebt es oder ändert dessen Größe	mehrere Markierungen mit  + Linksklick
	ändert die Darstellung des Bildes (Graustufen oder 15 Farben)	-
	öffnet diese Bedienungsanleitung im pdf-Format	erfordert Adobe Acrobat Reader DC
	beendet die Anwendung	-

Der Quellcode im Timeout-Case dient neben der Festlegung von Elementeigenschaften je nach Programmzustand der Anzeige des aktuellen Kamerabildes mit den zugehörigen Informationen. Die Angaben unter dem Kamerabild und das Histogramm rechts auf dem Frontpanel werden für jeden neuen Frame erfasst und dargestellt. Die Schaltflächen zur Auswahl des Filterraddmodul (Abb. 42, links) und für die Änderung der Darstellung des Kamerabildes (Graustufen oder 15 Farben) befinden sich im Blockdiagramm innerhalb des Timeout-Cases und sind ständig bedienbar. Ist der automatische Filterraddmodus aktiviert, wird aus dem Timeout-Case heraus die Meldung mit Fahrbefehlen an die parallele Slave-Schleife gesendet. Außerdem wird das Bedienelement für die manuelle Auswahl ausgegraut (Abb. 42, unten).



**Abb. 42:** Filterraddmodi (nur Sonnenofen-Version)

Mittels Eigenschaftsknoten werden Verhaltensweisen weiterer Frontpanelemente in jeder Iteration abhängig vom aktuellen Markierungszustand des Kamerabildes definiert. LabVIEW bündelt die relevanten Daten in einem ROI-Cluster (Region of Interest). Dieses enthält Angaben über die Art der Bildmarkierung (hier nur Punkt oder Rechteck), deren Anzahl und Position im Bildkoordinatensystem. So ist die Schaltfläche „Delete all Points“ nur bedienbar, wenn mindestens eine Markierung im Bild enthalten ist, ansonsten wird sie ausgegraut und deaktiviert. Ebenso wird die Aktivierung der Buttons „Measurement“ und „Evaluation“ nur eingeschaltet, wenn alle für die Bildentzerrung benötigten Passpunkte und die Pixelmatrix über dem Sensor zur Kalibrierung vorhanden sind. Eine Messung über die Schaltfläche „Measurement“ ist darüber hinaus nur möglich, wenn außerdem die Video-Anzeige läuft. Bei einem Standbild gibt es nur die Option der Auswertung per Button „Evaluation“. Das Betätigen von „Save Point Set“ ist ebenfalls nur bei vollständiger Bildmarkierung zulässig. Auch das Blinken der Elemente „Video“ und der Anzeigen „LL“, „LR“, „UR“, „UL“ und „PM“ wird mit Hilfe eines Eigenschaftsknotens umgeschaltet. Letztere sind eine Hilfestellung für den Anwender und geben die Markierungsreihenfolge der Passpunkte von unten links (LL – lower left) im Gegenuhrzeigersinn vor. Enthält das ROI-Cluster diese vier Passpunkte für die Bildentzerrung, blinkt das Element „PM“ und zeigt damit die fehlende Markierung der Pixelmatrix auf dem Sensor an. Sobald vier Punkte und ein Rechteck in das Bild gezeichnet wurden, werden die blinkenden Anzeigen ausgeschaltet.

Um vom Timeout-Case zu einem anderen Case der Ereignisstruktur zu gelangen, reagiert diese auf eine Wertänderung einer boolschen Frontpanelschaltfläche. Alle relevanten Buttons sind so eingestellt, dass sie beim Loslassen der Maustaste einen TRUE-Impuls generieren, um die Wertänderung hervorzurufen. In der LabVIEW-Programmierungsumgebung wird dieses Schaltverhalten „Latch beim Loslassen“ genannt. Alle Ereignis-Cases werden fortlaufend nummeriert, beginnend beim Timeout-Case mit der Nummer 0. Das Element, welches die Wertänderung hervorruft, ist im Blockdiagramm innerhalb des zugehörigen Cases platziert und wird nicht in den Datenfluss eingebunden. Für die folgenden Erläuterungen der Cases 1 bis 13 gilt, dass stets das Fehler-Cluster in den Datenfluss integriert wird und dass nicht genutzte Tunnel oder Schieberegister unverändert von der linken Eingangsseite bis zur rechten Ausgangsseite der WHILE-Schleife verbunden („durchgeschleift“) werden.

Ein Mausklick auf die Schaltfläche „Video“ lässt die Struktur zum Case 1 wechseln. Die Laufvariable „Grab läuft“ (Tab. 4) wird TRUE gesetzt, so dass diese in der nächsten Iteration mit dem neuen Wert erhalten bleibt. Um die Bildakquise aus dem Kamerasignal zu starten, wird die Referenz auf den Kamera-Port (Session) aus dem Schieberegister genutzt. Zwei hintereinander folgende SubVIs aus der LabVIEW-Bibliothek dienen der Konfiguration und dem Start der Aufnahme in diesem Case.

Der Case 2 reagiert auf die Schaltfläche „Photo“ und nimmt zum aktuellen Zeitpunkt ein Standbild aus dem Kamerasignal auf. Zuvor wird in einer IF-ELSE-Anweisung, die in LabVIEW „Case-Struktur“ genannt wird, überprüft, ob die Session sich im Aufnahmestand befindet. Der zu prüfende Wert befindet sich in der Laufvariablen „Grab läuft“. In diesem Fall wird die Aufnahme über ein vorgefertigtes SubVI gestoppt, um anschließend das Standbild aufnehmen zu können. Dieses Bild wird in den Schieberegisterausgang „Kamerabild“ geführt und die Laufvariable „Grab läuft“ mit einer FALSE-Konstanten überschrieben. Im Timeout-Case der nachfolgenden Iteration wird nach Abschluss von Case 2 somit ein Standbild auf dem Frontpanel dargestellt.

Der „Zoom to Fit“-Button ruft Case 3 auf, in dem über einen Eigenschaftsknoten der Eigenschaftswert „Zoom to Fit Mode“ mit TRUE beschrieben wird. Dies führt dazu, dass LabVIEW das gesamte Bild aus dem Kamerasignal im Bild-Anzeigeelement darstellt. Eine zuvor eingestellte Zoom-Operation über den Button mit dem Lupensymbol links oben neben dem Bild wird durch diese Operation rückgängig gemacht.

Case 4 öffnet nach Betätigen der Schaltfläche „Save Image“ einen Windows-Dateidialog zum Speichern des aktuell angezeigten Kamerabildes im Bitmap-Format. Wird der Dialog vom Nutzer abgebrochen, generiert das LabVIEW-Unterprogramm zum Speichern einen Fehler mit dem Fehlercode 43. Eine Case-Struktur prüft das Fehler-Cluster auf diesen Code und löscht ihn, um einen Programmabbruch aufgrund dieses für den Programmablauf unkritischen Fehlers zu verhindern. Die Option zum Speichern von Kamerabildern ermöglicht unter anderem, mit der FMAS-Software Dunkelbilder und Shadingbilder aufzunehmen.

Um zuvor gespeicherte Bilder erneut auf dem Frontpanel anzuzeigen, kann der Anwender über die Schaltfläche „Load Image“ von einem Datenträger Bitmap-Dateien auswählen. Wie in Case 2 („Photo“) wird auch in diesem Case 5 zunächst eine im Aufnahmemodus befindliche Session gestoppt und „Grab läuft“ auf den Wert FALSE gesetzt. Anschließend wird ein Dateidialog zur Bildauswahl angezeigt und mit Hilfe eines LabVIEW-SubVIs geladen. Wieder wird der Fehler 43 beim Schließen des Dialogs ignoriert. Nach dem Laden der Bitmap-Datei in das Schieberegister „Kamerabild“ wird ein weiterer Dialog angezeigt. Hier wird dem Anwender angeboten, zu dem ausgewählten Bild gehörende Markierungen ebenfalls zu laden. Wird dieser Dialog mit „Yes“ quittiert, folgt ein Unterprogramm zum Lesen der Textdatei „FMAS.ini“ (Abb. 38), in der die entsprechenden Inhalte des ROI-Clusters enthalten sind.

Die Schaltfläche „Set Dimension“ startet den Quellcode in Case 6 der Ereignisstruktur, welcher den Dialog „Target und Apertur“ (Abb. 41) aufruft. Der Anwender kann die bei Programmstart festgelegten Maße und die Form der Apertur ändern. Um die neuen Werte für den weiteren Programmablauf zu übernehmen, werden die Schieberegister „Apertur“ und „Objektkoordinaten“ am Schleifenausgang mit diesen Eingaben beschrieben.

Neben den bereits erwähnten Eigenschaftsknoten zur Definition von Verhaltensweisen können in LabVIEW auch gewisse Operationen an Frontpanelementen programmatisch durchgeführt werden. Der Befehl erfolgt dabei nicht durch eine Benutzerinteraktion auf dem Frontpanel, sondern wird aus dem Quellcode heraus mit Hilfe eines Methodenknotens generiert. Für die verschiedenen Typen von Frontpanelementen oder auch Programmteilen sind unterschiedliche Methoden editierbar. In Case 7 der Ereignisstruktur ist ein Methodenknoten mit der Referenz auf die Kamerabildanzeige enthalten. Die ausgewählte Methode lautet „Clear ROI“. Nach Betätigung der Schaltfläche „Delete all Points“ werden damit alle im Bild enthaltenen Markierungen (Punkte und Rechtecke) aus dem ROI-Cluster entfernt.

Der Button „Save Point Set“ veranlasst einen Wechsel zu Case 8. Zunächst wird wie zu Case 4 („Save Image“) beschrieben eine Bitmap-Datei an einem vom Nutzer auswählbaren Speicherort abgelegt. Zusätzlich wird hier die erwähnte Datei „FMAS.ini“ mit dem Inhalt des aktuellen ROI-Clusters beschrieben. Der absolute Ordnerpfad, unter dem das Bild gespeichert ist, dient als Überschrift in der Textdatei, der sogenannte Abschnitt. Dieser wird durch eckige Klammern eingefasst und als solcher kenntlich gemacht. Die ROI-Daten aller in diesem Ordner vorhandenen Bilder werden darunter nach folgendem Schema eingetragen.

#### [Ordnerpfad]

**Bildname.bmp = "314;854;761;866;757;363;316;387;523;612;533;622;"**

Der Dateiname wird als Schlüssel bezeichnet, der rechte Teil in Hochkommata als Wert. Der Wert besteht aus den semikolongetrennten Bildkoordinaten aller Markierung. Beginnend unten links und im Gegenuhrzeigersinn fortschreitend beschreiben die ersten acht Zahlen die Koordinatenpaare der vier Passpunkte, jeweils in der Form „x;y“.

LabVIEW definiert den Koordinatenursprung eines Bildes oben links, die Abszisse horizontal und die Ordinate vertikal. Die letzten vier Ziffern beschreiben das gezeichnete Rechteck (Pixelmatrix) in der Form „links;oben;rechts;unten;“.

Der festgelegte Aufbau der Textdatei „FMAS.ini“ ermöglicht das Lesen der Zeilen nach einem gleichbleibenden Algorithmus. Der zugehörige Code ist in einem SubVI zusammengefasst und findet sowohl in Case 5 („Load Image“) als auch in Case 9 Anwendung. Letzterer reagiert auf die Schaltfläche „Load Point Set“ und entnimmt der Datei „FMAS.ini“ die Koordinaten der Markierungen. Diese werden in das bestehende ROI-Cluster geschrieben und dadurch auf dem Frontpanel angezeigt. Anders als nach dem Betätigen von „Load Image“ wird hierbei das Kamerabild nicht geladen. Diese Funktion der FMAS-Software ermöglicht auch bei einer späteren Programmausführung, zuvor markierte Passpunkte anzuzeigen. Dies ist erforderlich, wenn ein zu bestrahlendes Experiment aufgebaut und deshalb die Montage eines Targets zum Einmessen mit erheblichem Aufwand verbunden ist.

Der Hauptzweck der FMAS-Software besteht in der Messung von Strahlungsflussdichte anhand eines Kamerabildes. Die Schaltflächen „Measurement“ und „Evaluation“ veranlassen die Bildauswertung, indem die Ereignisstruktur in den Case 10 wechselt. Darin wird zunächst mittels einer Case-Struktur abgefragt, welcher der beiden Buttons angeklickt wurde. „Measurement“ nimmt aus dem aktuellen Kamerasignal 32 Bilder hintereinander auf und bildet deren Mittelwert. Dieses sogenannte Rohbild wird im weiteren Verlauf ausgewertet. Ist stattdessen die Schaltfläche „Evaluation“ betätigt worden, erfolgt die Auswertung des derzeit geladenen Bildes. Der nachfolgende Quellcode zur Bildauswertung in Case 10 wird in Kapitel 4.3.7 detailliert beschrieben.

Ebenso wird die Filterraststeuerung in einem eigenen Abschnitt behandelt (Kapitel 4.3.6). Case 11 der Ereignisstruktur reagiert im manuellen Modus auf die Auswahl der Filterpositionen 0 bis 7 von Doppel- und Einfachfilterrad (Abb. 42, „double“ / „single“).

Der vorletzte Case 12 beinhaltet den Quellcode zur Anzeige einer Hilfe-Datei. Das weiße Fragezeichen im blauen Kreis oben rechts auf dem Frontpanel löst den Aufruf aus. Es wird ein Windows-Systembefehl ausgeführt, um den „Acrobat Reader DC“ aus dem Standard-Programmverzeichnis zu starten und die Hilfe-Datei darin zu öffnen.

Um die Software zu beenden, wird die Schaltfläche oben rechts (weißes „X“ auf rotem Grund) angeklickt, was einen Wechsel der Ereignisstruktur zu Case 13 hervorruft. Der Ausgangstunnel mit der booleschen Konstanten zum Beenden der Schleife (ähnlich Abb. 39, „Beenden-Schaltfläche“) wird ausschließlich in diesem Case mit TRUE beschrieben, was die Beendigung der WHILE-Schleife bewirkt. Außerdem werden in diesem abschließenden Case alle Standardwerte des Programms wiederhergestellt. Ein Methodenknoten mit der Referenz auf das Haupt-VI führt die Operation durch, die beispielsweise alle Anzeigeelemente auf dem Frontpanel zurücksetzt, Text-Anzeigen leert und numerische Anzeigen mit 0 beschreibt. Bei einem erneuten Programmstart wird dadurch verhindert, dass dem Nutzer nicht mehr gültige Daten auf dem Frontpanel angezeigt werden.

Bevor das Programmfenster sich automatisch schließt, werden die Referenzen auf das Kamerabild, die Session, den Melder und den Motortreiber geschlossen und aus dem Arbeitsspeicher entfernt. Die Ausführung des Betriebssystems kann nach dem Schließen von FMAS somit ohne Ressourcen verbrauchenden Einfluss der Software fortgesetzt werden.

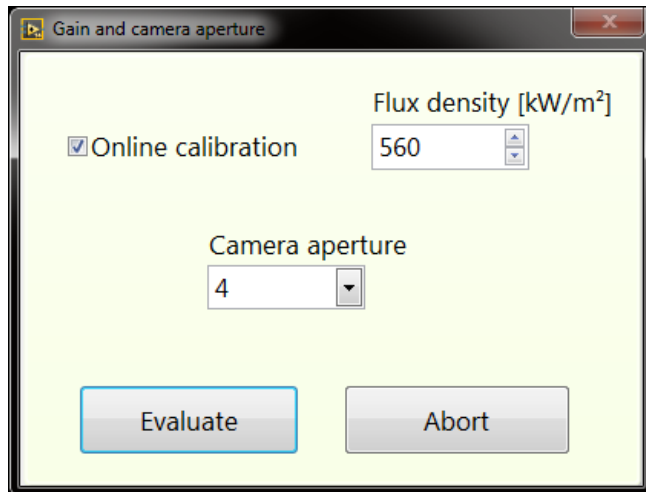
### 4.3.5 Flussdichtemessung mit FMAS

Die folgenden Abschnitte erläutern die Vorgehensweise bei der Bedienung von FMAS aus Sicht des Anwenders (Frontpanel). Die Hauptfunktionen der Software werden über die Schaltflächen „Measurement“ und „Evaluation“ umgesetzt. Die Strahlungsflussdichte kann damit entweder direkt von einer bestrahlten Fläche gemessen oder anhand eines gespeicherten Fotos ermittelt werden. Eine detailliertere Darstellung mit Screenshots der einzelnen Schritte ist Anhang A6 zu entnehmen.

#### 4.3.5.1 *Messung mit Referenz-Radiometer (Online-Messung)*

1. Live-Bild-Anzeige aktivieren (Schaltfläche „Video“ blinkt)
2. Kamerakonfiguration (Blende, Filter, Position) zur Darstellung aller Passpunkte einrichten
  - Kamera auf Target mit Passpunkten (= Target-Ecken) ausrichten
3. Bild einmessen
  - 3.1. **ENTWEDER:** 4 Eckpunkte des Targets und Rechteck über dem Radiometer markieren
    - Reihenfolge gemäß gelb blinkender Anzeigen beachten
    - beim Markieren stets „Strg“ gedrückt halten
    - beim Zoomen / Verschieben darf „Strg“ losgelassen werden
    - Schaltfläche „Save Point Set“ betätigen, falls Markierungen gespeichert werden sollen
  - 3.2. **ODER:** vorhandene Markierungen laden
    - Schaltfläche „Load Point Set“ betätigen
    - gewünschtes Einmessbild auswählen und laden
4. Kamerakonfiguration (Blende, Filter) zur Darstellung der erwarteten Strahlung einrichten

5. Referenz-Radiometer im Fokus positionieren und Messwert unter Bestrahlung notieren
6. Zentrum der lambertschen Fläche (= Target-Mitte) unter Bestrahlung im Fokus positionieren
7. Schaltfläche „Measurement“ betätigen
8. Messwert aus Pkt. 5. eingeben und eingestellte Blende auswählen:



**Abb. 43:** Dialog "Bildauswertung Online"

9. Ergebnis-Fenster lädt und bleibt bis zum Betätigen der Schaltfläche „Return to Main“ (Tab. 6) aktiv, das Haupt-Fenster bleibt währenddessen gesperrt
  - Schaltfläche „Change View“ (Tab. 6) wechselt die Darstellung des linken Graphen
    - 3D-Ansicht
      - Drehen: Ziehen mit gedrückter, linker Maustaste
      - Zoomen: „Umschalt“ + Ziehen mit gedrückter, linker Maustaste
      - Verschieben: „Strg“ + Ziehen mit gedrückter, linker Maustaste
    - Seitenansicht (über Target-Breite)
    - Seitenansicht (über Target-Höhe)
10. nach Rückkehr wird im Haupt-Fenster das korrigierte und entzerzte Bild angezeigt
11. die nächste Messung kann gemäß Pkt. 1. – 10. erfolgen

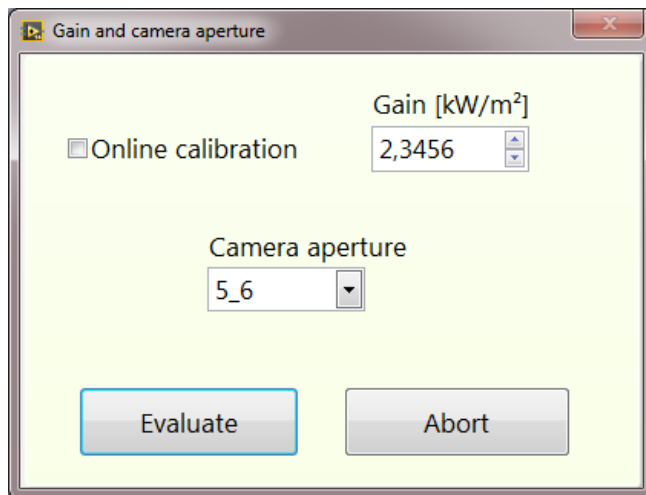


#### **4.3.5.2 Auswertung bestehender Rohbilder**

1. Bild von Datenträger per Schaltfläche „Load Image“ laden
2. Bild einmessen
  - 2.1. **ENTWEDER**: ursprüngliche Markierungen des Bildes übernehmen (Dialog)
    - die Markierungen können mit dem Punkt- / Rechteck-Werkzeug verschoben / korrigiert werden
  - 2.2. **ODER**: neue Markierungen setzen
    - Reihenfolge gemäß gelb blinkender Anzeigen beachten
    - beim Markieren stets „Strg“ gedrückt halten
    - beim Zoomen / Verschieben darf „Strg“ losgelassen werden
    - Schaltfläche „Save Point Set“ betätigen, falls Markierungen gespeichert werden sollen
3. Auswertung durch Betätigen der Schaltfläche „Evaluation“ starten
4. Pkt. 8. – 10. (Kapitel 4.3.5.1)
  - Checkbox **Online-Kalibrierung** im Dialog
    - aktiviert: Flussdichte eingeben
    - deaktiviert: Verstärkungsfaktor (Gain) eingeben
5. die nächste Auswertung kann gemäß Pkt. 1. – 4. erfolgen

#### **4.3.5.3 Messung ohne Referenz-Radiometer (Offline-Messung)**

FMAS bietet neben den oben geschilderten Methoden auch ein Verfahren ohne Referenz-Radiometer, die Offline-Messung. Dazu ist grundsätzlich wie bei der Online-Messung (4.3.5.1) zu verfahren. Der Unterschied besteht in den Eintragungen im Dialog „Bildauswertung“. Abbildung 44 zeigt den Dialog mit deaktivierter Option „Online calibration“. Ist kein Radiometer vorhanden, wird rechts oben anstelle eines Flussdichtewertes der Verstärkungsfaktor (Gain) abgefragt. Dieser entstammt einer zuvor durchgeführten System-Kalibrierung. Für jede Blenden- und Filterkombination mit der aktiven Messkamera sind dadurch die verschiedenen Faktoren bekannt. Die Berechnung des Gain ist Kapitel 4.3.7 zu entnehmen. Im Dialog ist der Faktor für die aktuell verwendete Kombination aus Kamera, Objektiv, Blende und Filter einzutragen.



**Abb. 44:** Dialog "Bildauswertung Offline"

### 4.3.6 Filtrerradsteuerung

Zur Verstellung der Filtrerräder wird die Schrittmotorsteuerung Phytron MCC2 32-48 mini über eine 9-polige D-Sub-Buchse mit dem seriellen Kommunikationsanschluss des Computers (COM-Port) verbunden. Die Steuerung nutzt zur Parametrierung den RS232-Standard mit einer vom Hersteller definierten Befehlssyntax. Das Empfangssignal „RxD“ befindet sich an Pin 2 der Buchse, das Sendesignal „TxD“ auf Pin 3 und die gemeinsame Signalmasse GND auf Pin 5. Computerseitig wird „RxD“ mit dem Empfänger „TD“ (Pin 3) und „TxD“ mit dem Sender „RD“ (Pin 2) verbunden. Die verbundenen Masseleitungen befinden sich beiderseits auf Pin 5. Es werden keine weiteren Signale bei der Kommunikation zwischen Schrittmotorsteuerung und Computer verwendet.

National Instruments hat zur Kommunikation mit verschiedenen Instrumenten in LabVIEW das Modul VISA implementiert. Mit den dafür vorgefertigten SubVIs sind alle Operationen für die RS232-Kommunikation mit LabVIEW programmierbar. Während der Initialisierungsphase von FMAS wird einmalig der serielle Port konfiguriert. Die Übertragungsgeschwindigkeit wird über die Baudrate mit 57600 Symbolen pro Sekunde festgelegt. Für die Zuweisung der Motorsteuerung im Betriebssystem wird COM1 als Port definiert. Außerdem sind Angaben über die Anzahl der Daten- und Stoppbits, die Fehlererkennung (Parität), die Art der Ablaufsteuerung und das Befehls-Endzeichen erforderlich. Diese unterscheiden sich für verschiedene Instrumente und werden vom Hersteller vorgegeben. Die verwendete Schrittmotorsteuerung ist ohne Parität, mit 1 Stoppbit und mit 8 Datenbits als ASCII-Code anzusprechen.

Nach der Definition aller Schnittstellenparameter können Daten über den Com-Port gelesen und geschrieben werden. Die vom Hersteller Phytron für die Steuerung MCC2 vorgeschriebene Befehlssyntax trägt den Namen MINILog. Ein Sendetelegramm hat den Aufbau „02<sub>H</sub>AdresseAchseBefehl03<sub>H</sub>“. 02<sub>H</sub> in und 03<sub>H</sub> in hexadezimaler Schreibweise markieren Beginn und Abschluss des Befehltextes. Für das VISA-Modul in LabVIEW werden hexadezimale Werte mit vorangestelltem „\“-Zeichen generiert. Der Dezimalwert 0 wird bei jedem Befehl als „Adresse“ angegeben, weil nur eine

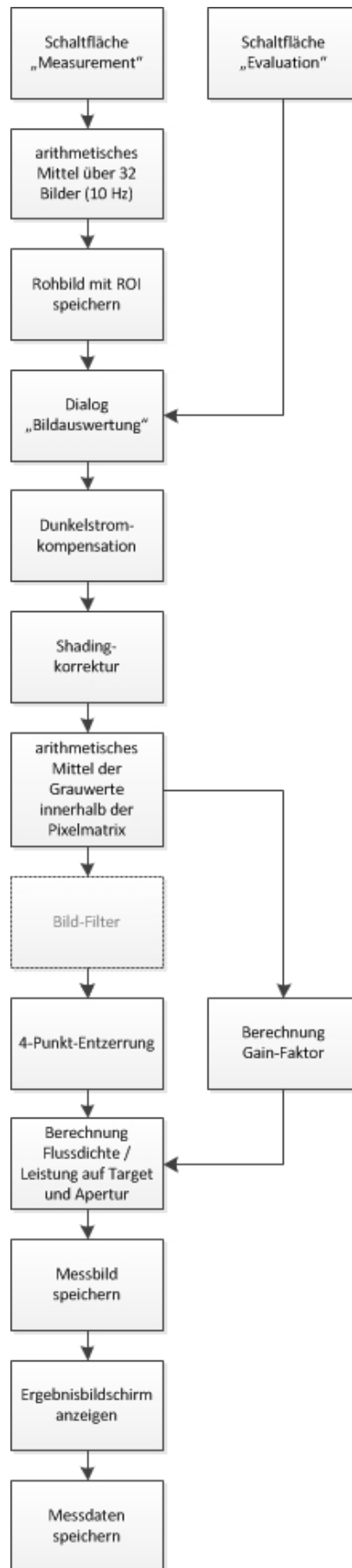
Schrittmotorsteuerung für das Filterrad verwendet wird. Die erste und in diesem Falle letzte Steuerung in einem Netzwerk wird mit 0 adressiert. „Achse“ kann je nach Filterrad die Dezimalwerte 1 und 2 beinhalten und steht für einen der beiden Schrittmotoren, die das Doppelfilterrad und das Einfachfilterrad antreiben. Im Bereich „Befehl“ ist der Text enthalten, der den entsprechenden Motor anweist. In FMAS werden die Befehle zur Initialisierung und zur absoluten Positionierung verwendet. Damit ein Filterrad seinen Endschalter von einer festgelegten Richtung anfährt, ist der Befehltext „0-“ erforderlich, eine Absolutpositionierung zur Schrittzahl „\$“ wird durch „A\$“ erzielt. Die Filterpositionen sind jeweils 800 Motorschritte voneinander entfernt. Die Mechanik ist so eingerichtet, dass jeweils die Positionen 1 ohne Filter dem Schrittzählerwert 0 entsprechen. Der Befehl im LabVIEW-STRING-Format „\0201A1600\03“ erwirkt die Auswahl von Filterposition 3 (Schrittzähler 1600) des Doppelfilterrades (Achse 1). Das Anfahren der Endschalter aus negativer Richtung über den Befehl „0-“ wird nur einmalig vor Start der Hauptschleife zur Kontrolle der Mechanik durchgeführt. Anschließend werden die Positionen per Absolutwertvorgabe gewählt.

Im manuellen Operationsmodus des Filterrades wählt der Benutzer die Kombination durch Mausklick auf die entsprechenden Positionen 0 bis 7 für das jeweilige Filterrad (Abb. 42, double und single). Case 11 der Ereignisstruktur reagiert auf alle Wertänderungen in der Positionsauswahl und sendet die entsprechenden Befehle an die Schrittmotorsteuerung. Wird die Schaltfläche auf den Automatik-Modus umgestellt, entscheidet das SubVI „Sub\_Autofilter\_Sender“ im Timeout-Case der Ereignisstruktur darüber, ob die optische Dichte verstärkt oder verringert werden muss. Dazu wird der aktuelle, maximale Grauwert des Kamerabildes in Bezug auf einen festen Wertebereich überprüft. Liegt dieser Wert oberhalb der unteren Grauwertschwelle (170) und unterhalb der oberen Grauwertschwelle (250), bleibt die Filterkombination erhalten. Die optische Dichte bleibt aufgrund der oberen Schwelle so eingestellt, dass der Chip nicht übersteuert wird. Gleichzeitig wird eine ausreichende Helligkeit des Bildes über die untere Schwelle gewährleistet. Zwei ineinander verschachtelte Case-Strukturen kontrollieren bei jeder Iteration des Timeout-Cases, ob der Maximalwert außerhalb des Wertebereichs liegt. Bei Überschreitung des Grauwertes 250 wird zunächst über das Einfachfilterrad und anschließend über das Doppelfilterrad die gesamte optische Dichte der Kombination erhöht, um das Bild abzdunkeln. Die Positionen 1 bis 7 (Tab. 2) des Einfachfilterrades werden nacheinander gewählt. Ist der maximale Grauwert bei Position 7 noch höher als 250, so wird der nächste Filter des Doppelfilterrades eingestellt und das Einfachfilterrad wieder in Position 1 gedreht. Bei Unterschreiten des Grauwertes 170 werden die Positionen in der umgekehrten Reihenfolge 7 bis 1 angefahren. Die Soll-Positionen sendet das SubVI aus dem Timeout-Case an die parallele Schleife, in der diese Fahrbefehle an die Schrittmotorsteuerung über die RS232-Schnittstelle gesendet werden. Die aktuellen Positionen der beiden Filterräder werden in der parallelen Empfängerschleife in Schieberegistern aktualisiert. In der Sender-Struktur der Hauptschleife liegen diese als Melderdaten vor und werden dort genutzt, um die nächste Position zu ermitteln. Sind

beispielsweise die Positionen 5 am Einfachfilterrad und 4 am Doppelfilterrad eingestellt und der maximale Grauwert des Kamerabildes beträgt 160, so führt der Fahrbefehl an die Schrittmotorsteuerung zur Auswahl von Position 4 des Einfachfilterrades: „\0202A3200\03“. An das Doppelfilterrad (Achse 1) wird kein Befehl gesendet. Die erneute Prüfung des Wertebereichs erfolgt in der folgenden Schleifeniteration der Hauptschleife.

#### **4.3.7 Bildkorrektur und Leistungsberechnung**

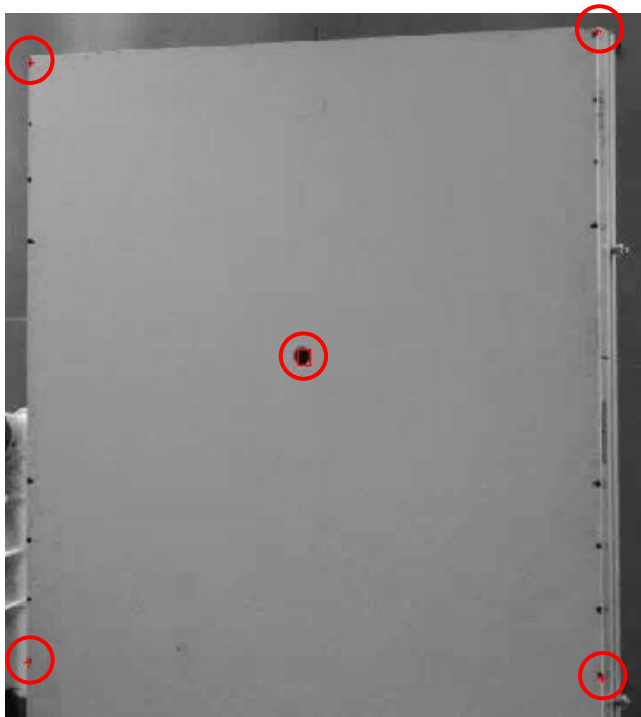
Die zentrale Aufgabe des Messsystems FMAS besteht in der Auswertung von Kamerabildern, aus denen die Verteilung der Strahlungsflussdichte und der Leistungsgehalt ermittelt wird. Case 10 der Ereignisstruktur enthält den dazu erforderlichen Quellcode, der im Folgenden beschrieben wird. Der Case wird aufgerufen, nachdem der Nutzer eine der Schaltflächen „Measurement“ oder „Evaluation“ auf dem Frontpanel betätigt hat. Während „Measurement“ vor den Korrekturmechanismen ein aktuelles Rohbild generiert, beginnt die Auswertung bei „Evaluation“ unmittelbar anhand eines geladenen Rohbildes (Kapitel 4.3.4). Das bei einer Messung generierte Rohbild wird aus 32 Einzelbildern erzeugt, die innerhalb von 3,2 Sekunden (10 Hz) aufgenommen werden. Die Grauwerte dieser Bilder werden für jede Pixelkoordinate aufaddiert und anschließend durch 32 dividiert. Das Rohbild entspricht dem arithmetischen Mittelwert der 32 Bilder, wodurch etwaige Bildunterschiede korrigiert werden. Ein konzentriertes Strahlenbündel am Sonnenofen kann seine Position auf dem Target beispielsweise durch Windstöße gegen den Heliostaten geringfügig verändern. Der Einfluss auf die Messung durch eine derartige Störung wird durch die Mittelung minimiert. Das berechnete Rohbild wird vor der Auswertung als solches gespeichert. Zudem werden die Markierungen (Passpunkte und Pixelmatrix) des Bildes der Datei „FMAS.ini“ wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben hinzugefügt. Nach Entstehung eines neuen oder der Übernahme eines vorhandenen Rohbildes folgt im Quellcode der Aufruf des Dialoges „Bildauswertung“, der in den Abbildungen 43 und 44 dargestellt ist. Die Quittierung des Dialogs mit der „Evaluate“-Schaltfläche startet die Korrekturmechanismen zur Auswertung des Rohbildes.

**Abb. 45:** Korrekturmechanismen

Das Ablaufdiagramm (Abb. 45) zeigt die nachfolgenden Schritte, die zur Flussdichteverteilung und zur Gesamtleistung der Strahlung führen, in der Reihenfolge ihres Aufrufs. Die ersten Korrekturmechanismen bilden die Kompensation des Dunkelstroms und des White Shadings (Kapitel 3.3.2 und 3.3.3). Aus der dunkelstrom- und shading-korrigierten Bildmatrix  $[I]_{ij}^{res}$  werden die Grauwerte in der Pixelmatrix ermittelt, die als Rechteck um die sensitive Fläche des Radiometers oder Kalorimeters aufgespannt ist. Der arithmetische Mittelwert aller Pixel innerhalb dieser markierten Matrix wird für die Berechnung des Verstärkungsfaktors zwischengespeichert. Die Pixelmatrix um ein Radiometer vom Typ Gardon ist mittig in Abbildung 46 zu erkennen. Der Gain-Faktor ergibt sich als Quotient aus dem skalierten Radiometersignal (Strahlungsflussdichte  $E$ ) und dem mittleren Grauwert der Pixelmatrix.

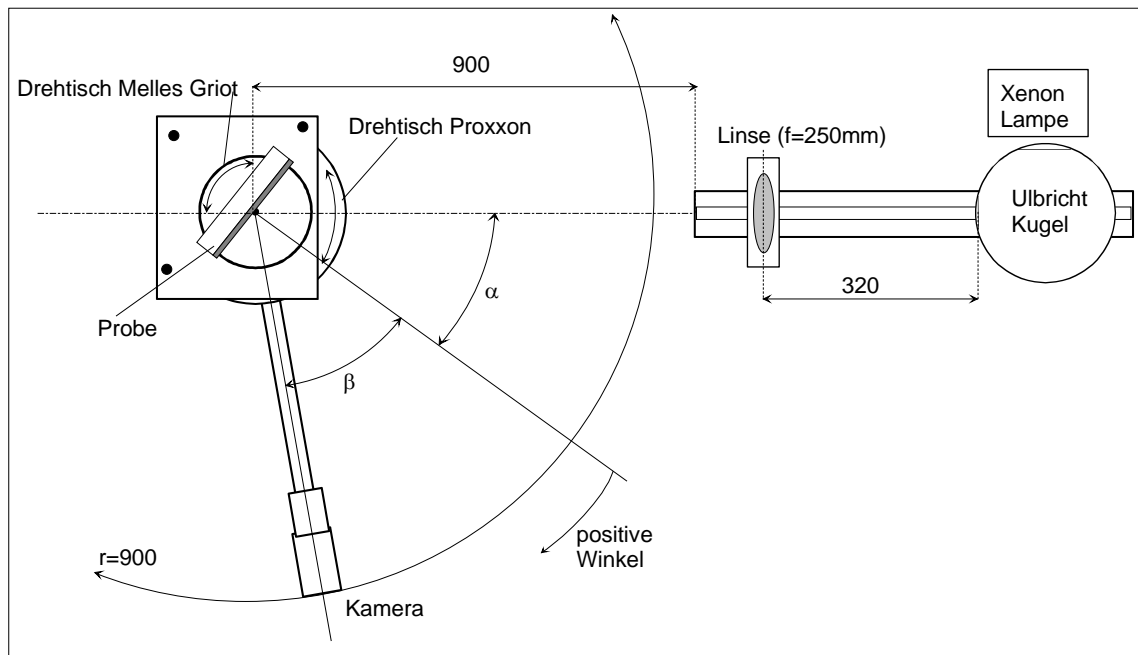
$$Gain = \frac{E}{\overline{GW}_{Pixelmatrix}} \quad (18)$$

Vor der projektiven Bildentzerrung besteht die Möglichkeit, ein 3 x 3 Pixel großes Median-Filter auf das gesamte Bild anzuwenden, um eventuell vorhandene Störspitzen im Bild zu eliminieren (vgl. [11]). Das Messsystem FATMES nutzt an dieser Stelle ein eindimensionales Filter mit der Pixelbreite 11. Dieses Filter ersetzt den aktuellen Grauwert durch den arithmetischen Mittelwert aus den 5 vorangehenden Pixeln, dem Pixel selbst und den 5 folgenden Pixeln. Der Quellcode für das Median-Filter in FMAS bleibt vorerst deaktiviert, um die Messergebnisse (Kapitel 4.4) nicht zu verfälschen. Es wird spekuliert, dass es aufgrund der wesentlich höheren Bildauflösung der Messkameras keiner Filterung bedarf.



**Abb. 46:** Target mit markierten Passpunkten

Der nächste Schritt in der Auswertung des Rohbildes besteht in der Korrektur der geometrischen Verzerrung aufgrund des Kamerastandortes (Kapitel 3.3.5). Abbildung 46 zeigt ein wassergekühltes Aluminiumtarget mit Aluminiumoxidbeschichtung, wie es am Sonnenofen und Hochleistungsstrahler beim DLR verwendet wird. Messungen haben gezeigt, dass sich diese Beschichtung bis zu einem Winkel von  $35^\circ$  zwischen Kamera und der optischen Achse der Strahlung ideal diffus (lambertsch) verhält [3]. Der prinzipielle Messaufbau ist in Abbildung 47 skizziert.

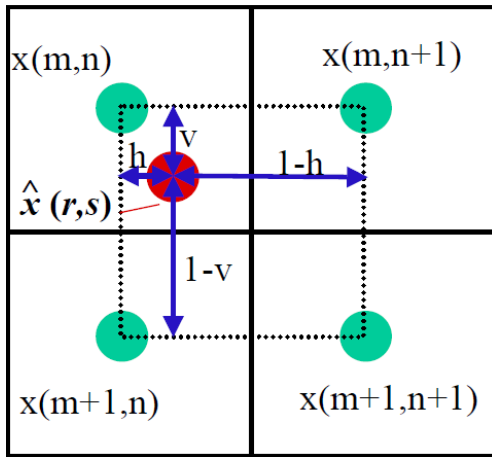


**Abb. 47:** Messung des Akzeptanzwinkels [3]

Auf dem Aluminiumtarget in Abbildung 46 sind links und rechts im Randbereich schwarze Passpunkte zu erkennen, die in definierten Abständen angebracht sind. In dem gezeigten Bild wird über vier rote Kreuze eine quadratische Fläche von 50 cm x 50 cm eingeschlossen. Der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten [Pixel] und Objektkoordinaten [cm] ist aufgrund dieser Markierungen bekannt. Nachdem der Nutzer die vier Eckpunkte auf dem Frontpanel in das Bild gezeichnet hat, sind deren Bildkoordinaten im ROI-Cluster gespeichert. Die Objektkoordinaten werden über den Dialog „Target und Apertur“ (Abb. 41) eingetragen. Die insgesamt acht Koordinatenpaare, bestehend aus den einheitenbehafteten Passpunktkoordinaten  $X_A, Y_A$  bis  $X_D, Y_D$  und den markierten Bildkoordinaten  $\xi_A, \eta_A$  bis  $\xi_D, \eta_D$ , ermöglichen die Bestimmung der unbekannten Parameter  $a_1$  bis  $c_2$  anhand Formel (11). Aus den Vorschriften (7) und (8) werden sämtliche Bildpunkte in Objektpunkte umgerechnet. Die transformierten Pixelkoordinaten  $\tilde{\xi}, \tilde{\eta}$  des entzerrten Bildes liegen nach der Operation teilweise auf nicht ganzzahligen Koordinaten, was eine Umwandlung in ein digitales Bild verhindert. Erst durch Interpolation der berechneten Werte entstehen für die neuen Bildkoordinaten diskrete Pixelkoordinaten. FMAS nutzt die Methode der bilinearen Interpolation. Diese entspricht einer Polynominterpolation 1. Grades in beiden Koordinatenrichtungen des Bildes.

Es werden die entzerrten Bildpunkte an den nicht ganzzahligen Koordinaten  $\hat{x}(r,s)$  anhand von vier umgebenden Punkten berechnet. Die Abstände dieser nicht ganzzahligen Punkte zu den umliegenden Pixelkoordinaten gehen bei der Berechnung gewichtet ein, wie folgende Gleichung zeigt. Die Skizze in Abbildung 48 stellt einen Bildausschnitt aus vier Pixeln mit einem entzerrten Punkt  $\hat{x}(r,s)$  mit seinen horizontalen (h) und vertikalen (v) Abständen dar.

$$\hat{x}(r,s) = h \cdot v \cdot x(m,n) + (1-h) \cdot v \cdot x(m,n+1) + h \cdot (1-v) \cdot x(m+1,n) + (1-h) \cdot (1-v) \cdot x(m+1,n+1) \quad (19)$$



**Abb. 48:** Bilineare Interpolation [17]

Das korrigierte Rohbild wird nach der Entzerrung zur weiteren Verwendung zugeschnitten. Die Bildbereiche außerhalb des durch die Passpunkte  $X_A, Y_A$  bis  $X_D, Y_D$  definierten Targets werden für die Leistungsbestimmung nicht verwendet und eliminiert. Aus dem Zuschnitt werden im weiteren Verlauf der Auswertung die Strahlungsflussdichteverteilung sowie die Leistungen auf der Targetfläche und auf der gegebenenfalls abweichenden Aperturfläche bestimmt.

$$\Phi_{Target} = \frac{A_{Target}}{\xi_{max,Target} \cdot \eta_{max,Target}} \cdot Gain \cdot \sum GW_{Target} \quad (20)$$

$$\Phi_{Apertur} = \frac{A_{Apertur}}{\xi_{max,Apertur} \cdot \eta_{max,Apertur}} \cdot Gain \cdot \sum GW_{Apertur} \quad (21)$$

$$E_{Target} = \frac{\Phi_{Target}}{A_{Target}} \quad (22)$$

$$E_{Apertur} = \frac{\Phi_{Apertur}}{A_{Apertur}} \quad (23)$$



Die Vorschriften (20) und (21) dienen jeweils der Berechnung der Strahlungsleistungen bezogen auf die unterschiedlichen Flächen.  $A_{\text{Target}}$  entspricht der von den vier Passpunkten  $X_A, Y_A$  bis  $X_D, Y_D$  umgebenen Fläche.  $A_{\text{Apertur}}$  bezeichnet den Flächeninhalt des benutzerdefinierten Bereichs, der als Kreis, Rechteck oder Quadrat angegeben werden kann. Die Produkte im Nenner  $\xi_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{max}}$  sind die entsprechenden Flächeninhalte im Bildkoordinatensystem. Sie repräsentieren die Pixelanzahl in den Flächenbereichen von Target und Apertur. Die Division der Fläche  $A$  im Objektmaßstab und der Fläche  $\xi_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{max}}$  im Bildmaßstab ist eine Normierung, die den Flächeninhalt eines einzelnen Pixels ergibt. Die Multiplikation des Quotienten mit der Summe  $\sum GW$  aller Grauwerte innerhalb der jeweiligen Fläche gibt das Volumen der Grauwertverteilung im dreidimensionalen Koordinatensystem mit  $\{x, y, z\} = \{\xi, \eta, GW\}$  an. Dieses Volumen wird durch Multiplikation mit dem Verstärkungsfaktor aus Formel (18) zu einer Flussdichteverteilung skaliert. Die Koordinaten der Verteilung lauten nach der Skalierung  $\{x, y, z\} = \{X[\text{cm}], Y[\text{cm}], E[\text{kW}/\text{m}^2]\}$ . Da die aufsummierten Pixel keine infinitesimal kleinen Flächenelemente sind, darf die geschilderte Volumenbestimmung nicht als Integral bezeichnet werden, obwohl sie mit dieser Methode vergleichbar ist. Die Berechnung der Strahlungsflussdichte bezogen auf die Flächen von Target und Apertur erfolgt gemäß (22) und (23) mit Hilfe der zuvor berechneten Leistungen.

Neben der Berechnung von Strahlungsfluss und Flussdichte wird anhand des korrigierten und entzerrten Bildes der Schwerpunkt der Verteilung ermittelt (Abb. 36, rotes Kreuz in der Draufsicht). Die Schwerpunktkoordinaten  $\{\bar{\xi}, \bar{\eta}\}$  werden über folgende Formeln berechnet:

$$\{\bar{\xi}, \bar{\eta}\} = \left\{ \frac{M_{\xi}}{\sum GW}, \frac{M_{\eta}}{\sum GW} \right\} \quad (24)$$

$$M_{\xi} = \sum_{i=0}^{\xi_{\text{max,Target}}-1} \sum_{j=0}^{\eta_{\text{max,Target}}-1} GW(i, j) \cdot i \quad (25)$$


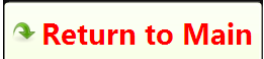
$$M_{\eta} = \sum_{i=0}^{\xi_{\text{max,Target}}-1} \sum_{j=0}^{\eta_{\text{max,Target}}-1} GW(i, j) \cdot j \quad (26)$$

Der Schwerpunkt in der Bildebene setzt sich aus den Bildmomenten  $M_{\xi}$  und  $M_{\eta}$  zusammen.  $\sum GW$  bezeichnet die Summe aller Grauwerte,  $M_{\xi}$  ist die Summe der Momente der Grauwerte um die  $\xi$ -Achse.  $M_{\eta}$  wird entsprechend als Summe der Momente der Grauwerte um die  $\eta$ -Achse gebildet. Diese Vorgehensweise ist angelehnt an die Schwerpunktberechnung eines massebehafteten Körpers, wie in [18] dargestellt. Anstelle der Gewichte von einzelnen Massepunkten werden in digitalen Bildern die Grauwerte von einzelnen Pixeln verwendet. Der Begriff „Bildmoment“ leitet sich dennoch

aus dem von Gewichtskräften erzeugten, mechanischen Moment ab. Im LabVIEW-Quellcode werden die Summen der Formeln (25) und (26) über zwei ineinander geschachtelte FOR-Schleifen gebildet. Die Grauwertmatrix  $GW(i,j)$  liegt als zweidimensionales Array vor und dient der Auto-Indizierung der Schleifen. Die Anzahl der Iterationen wird dabei anhand der Array-Dimensionen in  $\xi$ - und  $\eta$ -Richtung festgelegt. Eine FOR-Schleife iteriert so häufig, wie Bildzeilen existieren, die andere so oft, wie es Bildspalten gibt.

Mit den oben dargestellten Berechnungen enden die Bildkorrektur und die Bildauswertung. Aus dem Rohbild wurde ein Messbild erzeugt, welches in einem SubVI auf dem Datenträger als Bitmap-Datei gespeichert wird. Die Bedienoberfläche wird zur Benutzung gesperrt (Abb. 35) und der Ergebnisbildschirm (Abb. 36) wird angezeigt. In dem sich öffnenden Frontpanel des Unterprogramms „Sub\_Ergebnisse.vi“ stehen dem Nutzer zwei weitere Bedienelemente (Tab. 6) zur Verfügung.

**Tab. 6:** Buttons des Ergebnisbildschirms

Schaltfläche	Funktion	Bemerkungen
	wechselt die Perspektive des linken Graphen	3D-Ansicht, Seitenansichten über Target-Breite bzw. -höhe
	beendet die Ergebnis-Darstellung und kehrt zum Haupt-Fenster zurück	Ergebnisbildschirm wird geschlossen

Alle vier Ansichten der Strahlungsflussdichteverteilung werden als 3D-Graph in LabVIEW dargestellt. Die Schaltfläche „Change View“ steuert die Sichtbarkeit des dreidimensionalen Graphen und der beiden Seitenansichten per Eigenschaftsknoten. Der Schwerpunkt und die gestrichelten Mittellinien des Targets in der Draufsicht (Abb. 36, rechts) sind als Cursor definiert, deren Positionen ebenfalls über die entsprechenden Eigenschaftsknoten angegeben werden. Auch die programmatische Vorgabe der Farbgrenzen auf den Isolinien bei 10, 30, 50, 70 und 90 % der Maximalflussdichte geschieht durch 3D-Graph-spezifische Eigenschaften.

#### 4.3.8 Messdaten

FMAS bietet gegenüber dem bestehenden FATMES eine erhöhte Transparenz aufgrund der Sicherung aller relevanten Messdaten auf einem Datenträger. Neben den erwähnten Bitmap-Dateien für das Rohbild und das Messbild werden nach Quittieren des Ergebnisbildschirms über die Schaltfläche „Return to Main“ eine csv-Datei mit Messdaten und ein Screenshot des Ergebnis-Frontpanels gespeichert. Die ursprünglich von FATMES zu jeder Messung hinterlegten Grauwertmatrizen in Form von „kvx-Dateien“ sind wegen ausgefallener Hardware nicht mehr zugänglich. Seit dem Ausfall werden die Messergebnisse über einen schwarz-weißen Papierausdruck bereitgestellt. Der Ausdruck zeigt wahlweise die Draufsicht oder die Seitenansichten der Flussdichteverteilung. Während der Entstehung der vorliegenden Master Thesis ist auch an dem

dafür erforderlichen Drucker ein Defekt aufgetreten, so dass die FATMES-Ergebnisse nur noch auf dem Monitor angezeigt werden können.

Der in Abbildung 38 gezeigte FMAS-Dateiordner „Messdaten“ enthält sämtliche vom Nutzer angelegte Projektordner. Die Software erstellt bei Neuanlage eines Projektordners einmalig die Unterordner „1 Einmesspunkte“, „2 Rohbilder“, „3 Messbilder“ und „4 Daten“. Der erste Ordner wird beim Speichern von Markierungen nach Betätigen der Schaltfläche „Save Point Set“ vorgeschlagen, um darin das zugehörige Einmessbild zu speichern. Rohbilder und Messbilder werden zu den in Kapitel 4.3.7 genannten Zeitpunkten automatisch in den entsprechenden Ordnern „2 Rohbilder“ und „3 Messbilder“ abgelegt. Die Dateinamen setzen sich aus dem Datum und der Uhrzeit zum Speicherzeitpunkt zusammen.

***Projektname\_Rohbild\_JJJJMMTT\_HHMMSS.bmp***

***Projektname\_Messbild\_JJJJMMTT\_HHMMSS.bmp***

Der Ordner „4 Daten“ dient schließlich der Speicherung der csv-Dateien (Anhang A6) und der Screenshots mit allen für die Messung relevanten Angaben. Diese werden ebenfalls wie die Rohbilder und die Messbilder selbsttätig nach jeder Auswertung unter den folgenden Dateinamen abgelegt.

***Projektname\_Messdaten\_JJJJMMTT\_HHMMSS.csv***

***Projektname\_Messdaten\_JJJJMMTT\_HHMMSS.bmp***

Die Werte in der csv-Datei sind mit Überschriften versehen. Unter den Titeln „LLx“ bis „Matrix\_unten“ am Ende der ersten Zeile stehen die Koordinaten der Passpunkte entgegen des Uhrzeigersinns. Von „LLx“ (lower left, x-Koordinate) über „LR“ (lower right) und UR (upper right) bis ULy (upper left, y-Koordinate) können hier alle Pixelkoordinaten abgelesen werden, welche die Grundlage für die 4-Punkt-Entzerrung des Rohbildes waren. Die Daten unter „Matrix\_links“ bis „Matrix\_unten“ enthalten die Koordinaten der Pixelmatrix PM, mit deren Grauwerten der Gain-Faktor bestimmt wurde. Die nächsten Zeilen beinhalten die berechneten Leistungen und Flussdichten sowie Informationen zur Apertur und zum Schwerpunkt. Die Zeilen „Target-Breite [cm]“ und „Target-Höhe [cm]“ sind Arrays, in denen der Abstand zwischen benachbarten Werten der Pixelgröße in Zentimetern entspricht und deren letzter und größter Wert die Breite bzw. die Höhe des Targets bezeichnet. Die darunter stehende Flussdichte-Matrix repräsentiert das ausgewertete und skalierte Messbild. Die Division aller Werte mit dem Gain-Faktor aus der ersten Zeile führt auf das korrigierte und entzerrte Grauwertbild zurück.

## 4.4 Verifizierung

Zur Beurteilung der Messgenauigkeit des neuen Messsystems werden im Sonnenofen und im Hochleistungsstrahler des DLR in Köln Flussdichtemessungen anhand hochkonzentrierter Strahlung durchgeführt. Im Sonnenofen wird das LabVIEW-basierte System FMAS mit dem VAX-basierten System FATMES verglichen. FATMES stellt dabei als bewährte Messeinrichtung für diese Anwendung einen Anhaltspunkt für die Richtig-

keit der Ergebnisse dar. Die Messergebnisse im Hochleistungsstrahler werden auf Grundlage der bekannten Leistungen der einzelnen Strahler überprüft.

#### 4.4.1 Flusssichtmessung im Sonnenofen

Auf dem 3-Achsen-Tisch des Sonnenofens wird ein wassergekühltes Target, wie in Abbildung 46 dargestellt, senkrecht zur optischen Achse des Konzentrators positioniert. Zuvor justierte Laser zeigen den Brennpunkt der zu erwartenden Flusssichtverteilung an. Der Abstand des Targets zum Konzentrator wird exakt auf diese Brennweite eingestellt. In der Steuerung des 3-Achsen-Tisches werden zwei Positionen gespeichert, um eine Online-Messung mit Referenzradiometer (4.3.5.1) durchzuführen. Die erste Position dient dem Einmessen des Targets. Die vier Passpunkte sind im Kamerabild sichtbar und das Radiometer befindet sich in deren Mitte. Über das Frontpanel von FMAS werden die Passpunkte und die Pixelmatrix markiert. Nach Betätigen des Buttons „Save Point Set“ speichert die Software das Einmessbild als Bitmap und die relevanten Daten aus dem ROI-Cluster in der Datei „FMAS.ini“. Die zweite Position liegt in der gleichen Ebene wie die erste, jedoch sieht die Kamera hier nur die weiße Beschichtung. Das Radiometer und die Passpunkte sind in dieser Einstellung im Bildbereich innerhalb der markierten Punkte nicht sichtbar. Die dunklen Elemente würden die auftreffende Strahlung nicht lambertsch in Richtung des CCD-Chips reflektieren und die Messung dadurch verfälschen.

Das Target bei der Messung im Sonnenofen ist quadratisch mit einer Seitenlänge von 20 cm, die Apertur kreisförmig mit einem Durchmesser von 8 cm. Abbildung 49 zeigt die von FMAS berechneten Strahlungsleistungen  $\Phi_{Target}$  (rot) und  $\Phi_{Apertur}$  (blau) in Abhängigkeit der Shutteröffnung anhand von zehn Einzelmessungen.

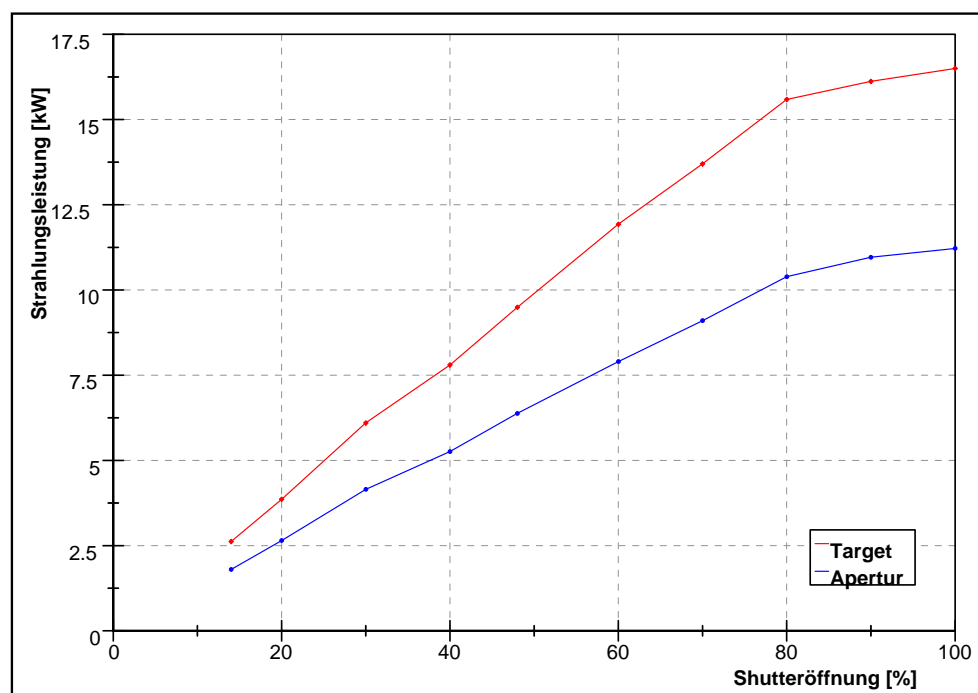
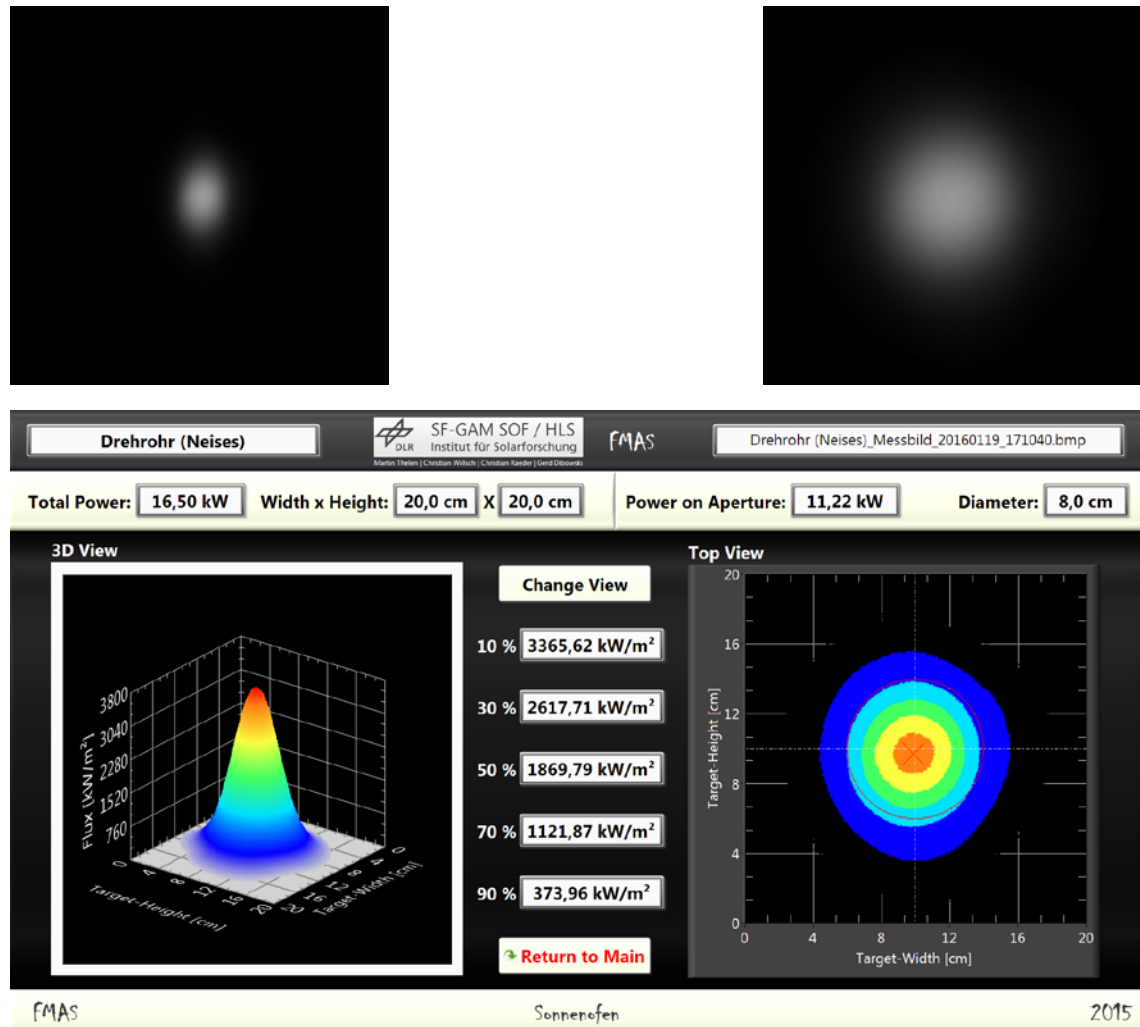


Abb. 49: Strahlungsleistung FMAS (SOF)

Die folgenden Darstellungen in Abbildung 50 zeigen exemplarisch für die letzte Messung bei einer Shutteröffnung von 100 % das nicht korrigierte Rohbild (oben links), das shadingkompensierte und entzerrte Messbild (oben rechts) sowie den Screenshot des Ergebnisbildschirms mit der dreidimensionalen Ansicht und der Draufsicht.



**Abb. 50:** Messdaten FMAS bei Shutteröffnung 100 % (SOF)

Die mit einer Gaußkurve vergleichbare Flussdichteverteilung der konzentrierten Solarstrahlung erstreckt sich über einen Bereich, der größer ist als die Aperturfläche. Dies erklärt die höheren Leistungen auf dem Target, auf dem das gesamte Strahlenbündel erfasst wird (Abb. 49).

#### 4.4.2 Vergleich der Messsysteme FATMES und FMAS

Bei sämtlichen oben geschilderten Messungen im Sonnenofen sind sowohl mit FATMES als auch mit FMAS zeitgleich Rohbilder aufgenommen worden. Abbildung 51 zeigt eine Fotografie des FATMES-Ergebnisbildschirms für die erste Messung im Sonnenofen bei einer Shutteröffnung von 14 %. Links ist die Draufsicht wie bei FMAS mit Markierungen für den Schwerpunkt und der Apertur sowie den Isolinien zu erkennen.

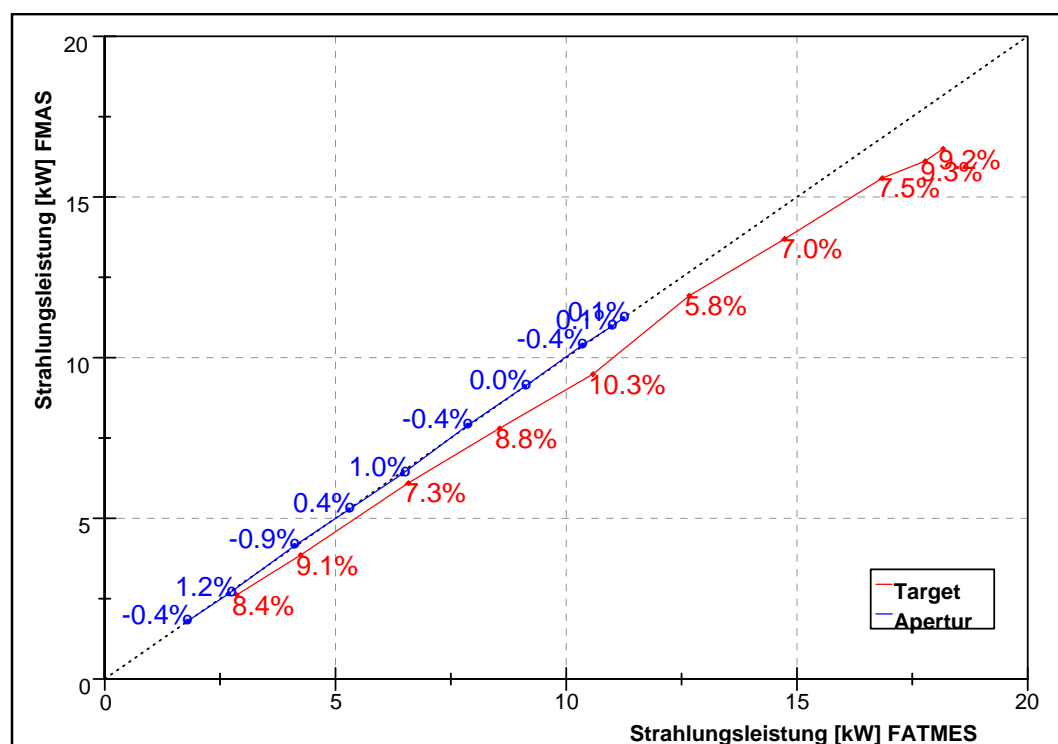
Die Leistungsdaten für das Target („Total“) und die Apertur („On Aper.“) befinden sich unten rechts in der Darstellung.



**Abb. 51:** Messdaten FATMES bei Shutteröffnung 14 % (SOF)

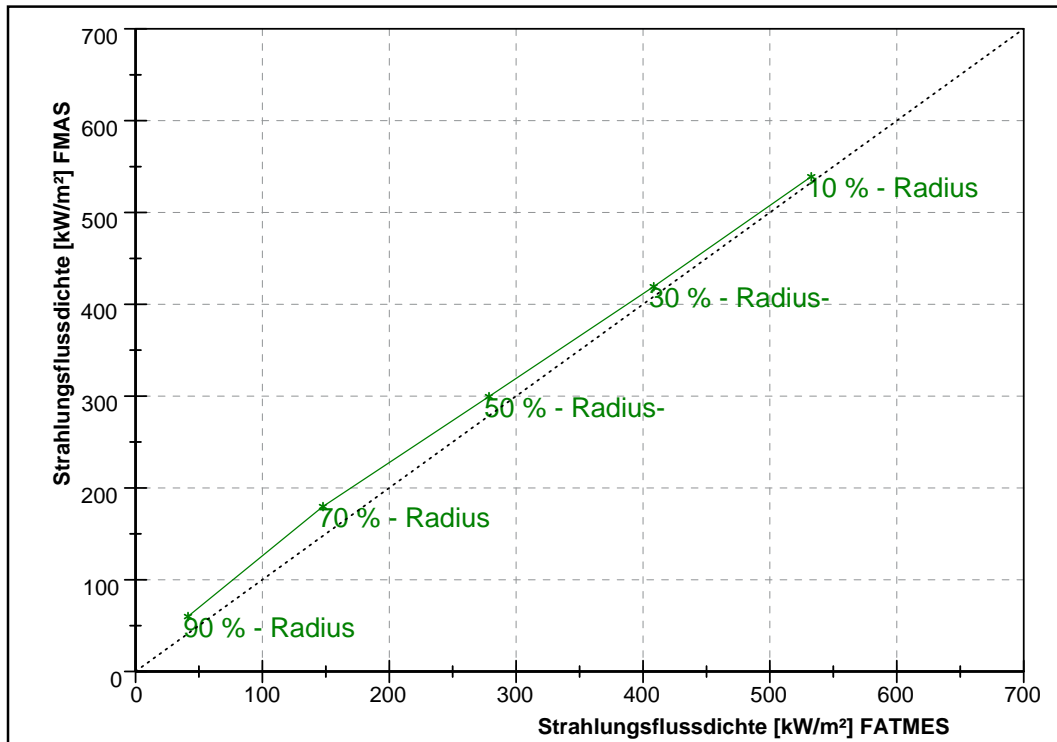
Ein Vergleich der von FMAS im Sonnenofen gemessenen Strahlungsleistungen mit dem bestehenden Messsystem FATMES zeigt eine hervorragende Übereinstimmung auf der Apertur (Abb. 52, blau). Das bestehende System generiert bei einer Shutteröffnung von 20 % einen um 1,2 % höheren Wert als FMAS. Die Abweichungen der übrigen neun Messungen stellen sich geringer dar.

Auffällig sind dagegen die Abweichungen bei den Leistungen auf dem Target. FATMES zeigt in dieser Gegenüberstellung (Abb. 52, rot) 5,8 % bis 10,3 % höhere Ergebnisse als FMAS.



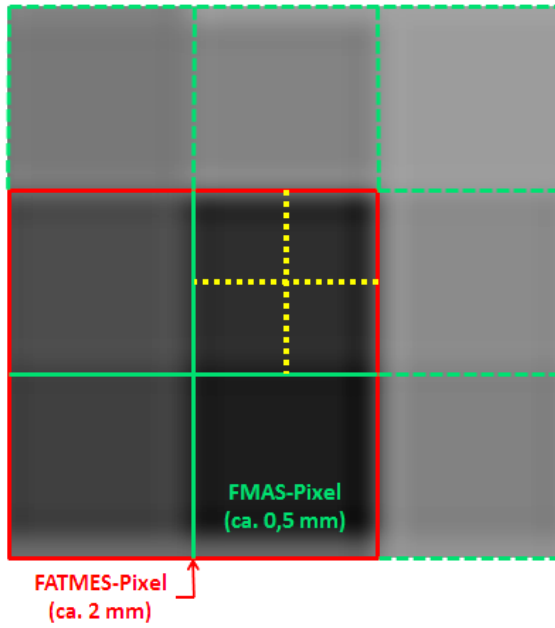
**Abb. 52:** Vergleichsmessung FATMES vs. FMAS (SOF)

Bei Betrachtung der Flussdichten beider Messsysteme treten diese Abweichungen in entgegengesetzter Richtung auf. FMAS berechnet aus den zeitgleich aufgenommenen Rohbildern stets größere Werte für die Strahlungsflussdichte. Abbildung 53 stellt diese Beobachtung als Kurve der Isolinien dar, die von beiden Messsystemen ermittelt werden.



**Abb. 53:** Flussdichte-Vergleich FATMES / FMAS (SOF)

Gleichung (22) lässt vermuten, dass die Ursache für diese Abweichungen durch eine genauere Betrachtung der Fläche  $A$  gefunden werden kann. Diese Behauptung setzt voraus, dass die Targetfläche in FMAS wesentlich kleiner ist als die entsprechende Fläche in FATMES. In beiden Programmen gibt der Nutzer die Objektkoordinaten so vor, dass die vier Passpunkte eine quadratische Fläche von 20 cm x 20 cm umschließen. Die Markierung dieser Punkte im Kamerabild unterscheidet sich jedoch voneinander. Während die Messkamera von FMAS eine Auflösung von 1.000.000 Pixeln (1000 x 1000) besitzt, stellt FATMES das Bild lediglich aus 262.144 Pixeln (512 x 512) zusammen. Ein Pixel des FATMES-Bildes ist damit etwa viermal größer als ein FMAS-Pixel. Die Genauigkeit der vom Anwender vorzugebenden Markierungen auf den Passpunkten wird durch diesen Faktor begrenzt. Eine Erklärung für die großen Abweichungen der Leistungen auf dem Target könnten nach dieser Erkenntnis unterschiedliche Genauigkeiten beim Einmessen sein. Die Systeme würden demnach die Fläche von 20 cm x 20 cm mit verschiedenen großen Bildausschnitten verknüpfen. Der nicht vom Nutzer beeinflussbare Fehler bei FATMES ist aufgrund der schlechteren Auflösung größer als bei FMAS.



**Abb. 54:** Auflösung der Passpunkte

Abbildung 54 verdeutlicht diesen Effekt anhand eines etwa 2 mm großen Passpunktes, der mit der FATMES-Kamera als ein Pixel dargestellt wird (roter Rahmen). Die neue Messkamera mit höherer Auflösung stellt den Passpunkt aus 4 Bildpunkten zusammen (grüne Rahmen). Die Markierung des Passpunktes (gelbes Kreuz) kann in beiden Messsystemen nur über das Pixelraster im Bild eingebracht werden. Zwischenplätze sind nicht auswählbar. Bei gewissenhafter Markierung ergibt sich für FMAS damit eine Ungenauigkeit von maximal einem halben Pixel (0,25 mm) in beiden Koordinatenrichtungen. Im Bild der FATMES-Kamera sind die unterschiedlichen Graustufen des Passpunktes nicht wie in Abbildung 54 erkennbar. Stattdessen wird ein Pixel mit dem mittleren Grauwert dargestellt. Zudem liegt der Passpunkt meist nicht exakt innerhalb eines Pixels, sondern wird auf mindestens zwei Pixeln abgebildet. Der Fehler beim Markieren beträgt bei FATMES bis zu 2 mm. Für das verwendete Target mit einer tatsächlichen Fläche von 0,04 m<sup>2</sup> (Seitenlänge 20 cm) können sich aufgrund der unterschiedlichen Bildauflösungen die in (27) bis (30) berechneten Flächen ergeben. Fehlbedienung wird nicht berücksichtigt.

$$A_{min,FMAS} = (200 \text{ mm} - 2 \cdot 0,25 \text{ mm})^2 = 0,03980025 \text{ m}^2 \quad (27)$$

$$A_{max,FMAS} = (200 \text{ mm} + 2 \cdot 0,25 \text{ mm})^2 = 0,04020025 \text{ m}^2 \quad (28)$$

$$A_{min,FATMES} = (200 \text{ mm} - 2 \cdot 2 \text{ mm})^2 = 0,039204 \text{ m}^2 \quad (29)$$

$$A_{max,FATMES} = (200 \text{ mm} + 2 \cdot 2 \text{ mm})^2 = 0,040804 \text{ m}^2 \quad (30)$$



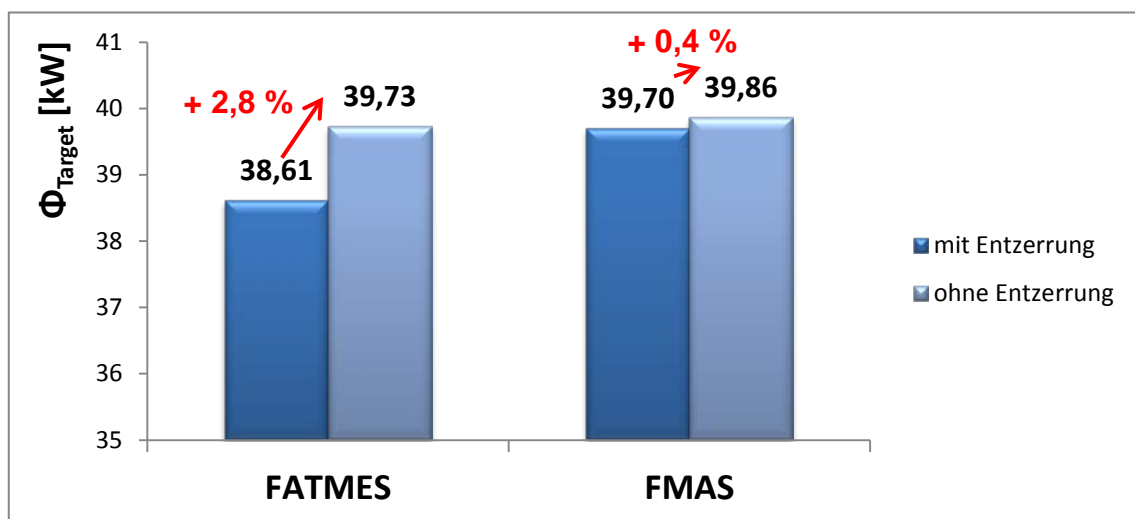
Die berechneten Flächen der beiden Messsysteme weichen etwa 2,5 % voneinander ab, wie die Formeln (31) und (32) zeigen.

$$\Delta_1 = \left( 1 - \frac{A_{\min, FMAS}}{A_{\max, FATMES}} \right) \cdot 100 \% = 2,46 \% \quad (31)$$

$$\Delta_2 = \left( 1 - \frac{A_{\min, FATMES}}{A_{\max, FMAS}} \right) \cdot 100 \% = 2,48 \% \quad (32)$$

In Gleichung (20) für die Leistung auf dem Target geht der Targetfläche als Faktor ein, so dass sich die Abweichung von 2,5 % unmittelbar auf die angezeigten Leistungswerte von FATMES und FMAS übertragen lässt.

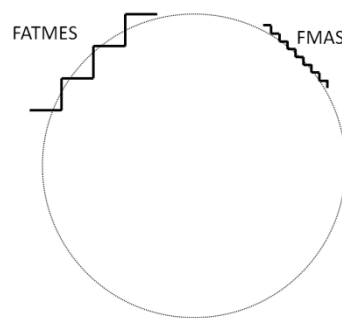
Da sich der beschriebene Fehler bei Markierung der Passpunkte auf den gesamten Maßstab bei der Auswertung auswirkt, stellt die gute Übereinstimmung der Leistungen auf der Apertur einen Widerspruch dar. Um die Behauptung, dass FMAS eine kleinere Fläche als FATMES zugrunde legt, zu überprüfen, werden beide Messkameras im Sonnenofen demontiert, um damit Bilder in einer Ulbricht-Kugel (Kapitel 3.3.3) aufzunehmen. Mit beiden Systemen werden je zwei Fotos des sphärischen Raums generiert. Bei der ersten Vergleichsmessung bleiben die Markierungen der Passpunkte aus der Messung am Sonnenofen bestehen. Die Messkameras waren dabei schräg zum Target ausgerichtet. Für die zweite Vergleichsmessung werden beide Kameras nacheinander senkrecht zu einem Target positioniert, um die Passpunkte zu markieren. Der Einfluss der Bildentzerrung wird durch diese Vorgehensweise eliminiert, weil aus der senkrechten Perspektive nur minimale projektive Verzerrungen auftreten. Der Gain-Faktor wird bei allen Messungen aus einer fiktiven Flussdichte von 1000 kW/m<sup>2</sup> in der Mitte des Targets ermittelt.



**Abb. 55:** Einfluss der projektiven Entzerrung

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung in der Ulbricht-Kugel zeigen eine Abhängigkeit der berechneten Leistungen von der projektiven Verzerrung der Aufnahmen. Während der Einfluss beim neuen Messsystem FMAS mit 0,4 % vernachlässigbar gering ist, führt die Bildentzerrung in FATMES zu einer um 2,8 % höheren Leistung (Abb. 55). Diese Abweichung und die Ungenauigkeit aufgrund der geringeren Bildauflösung ergeben in Summe einen Messfehler von 5,3 % bei FATMES.

Die Leistungswerte von FATMES und FMAS aus der Vergleichsmessung weichen nach Eliminierung der Bildentzerrung (Abb. 55) mit lediglich 0,4 % nicht nennenswert voneinander ab. Die Leistungen 39,73 kW, 39,70 kW und 39,86 kW sind mit einer Abweichung von maximal 0,4 % gleichwertig. Bei den beschriebenen Messungen mit FMAS ist das Median-Filter deaktiviert (Kapitel 4.3.7). Die Skizze in Abbildung 56 verdeutlicht den Grund für diese Festlegung. Die Messkamera, die bei FMAS eingesetzt wird, löst Kanten (Grauwertunterschiede) viermal höher auf als die FATMES-Kamera.



**Abb. 56:** Auflösung von Kanten

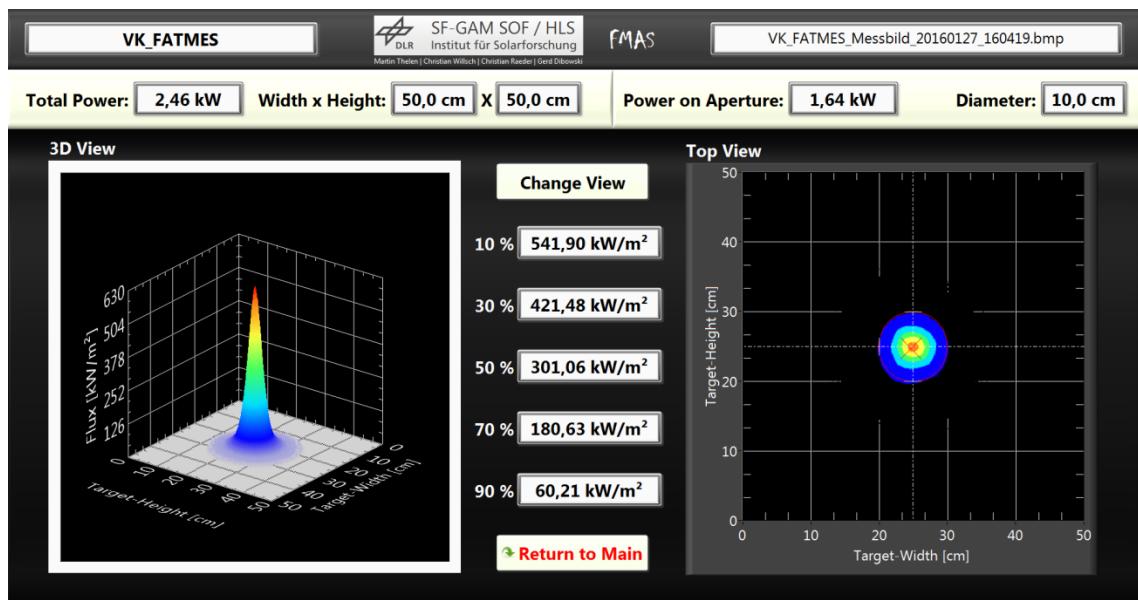
Ein Median-Filter zum Glätten dieser Kanten ist aufgrund der Erkenntnisse aus der Vergleichsmessung in der Ulbricht-Kugel nicht erforderlich. Die Ergebnisse von FATMES, welches aufgrund der geringeren Pixelanzahl einen Algorithmus zur Kantenglättung verwendet, und die von FMAS stimmen mit einer Abweichung von 0,3 % überein.

Die gute Übereinstimmung der Messsysteme bei den Leistungen auf der Apertur steht auch nach Betrachtung der Bildauflösung noch im Widerspruch zu den Abweichungen der Gesamtleistungen um bis zu 10,3 %. Die Ursache könnte das künstliche Shadingbild sein, welches in FATMES zur Kompensation verwendet wird. In welchen Grauwertbereich die Pixel dieses Bildes liegen, kann aufgrund defekter Hardware nicht bestimmt werden. Die Rohdaten sind nicht mehr zugänglich. Das realistische Shadingbild der FMAS-Filterrad-Kamera im Sonnenofen beinhaltet Grauwerte von 156 bis 207 und hat einen Mittelwert von 184,87. Abbildung 29 zeigt, dass die Grauwerte eines Shadingbildes vom äußeren Bildrand nach innen heller werden. Dies trifft ebenso auf das künstliche FATMES-Bild zu. Gemäß Formel (6) sind nach der Shadingkorrektur die Pixel des Rohbildes in der Bildmitte dunkler und zu den Rändern hin heller. Hellere Grauwerte führen bei der Kalibrierung zu höheren Flusssichten. Sämtliche Gesamtleistungen von FATMES liegen über denen von FMAS (Abb. 52). Aufgrund dieser Tatsache wird die These aufgestellt, dass die innenliegenden Grauwerte des FATMES-

Shadingbildes im Bereich der Apertur eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Eigenschaften des Aufnahmesystems (Kamera mit Objektiv) aufweist. Die Randpixel werden dahingegen durch das künstliche Bild zu sehr aufgehellt, so dass die außerhalb der Apertur befindlichen Rohbildpixel bei der Korrektur zu hohe Flussdichten ergeben. Dies führt auf zu große Leistungswerte bezogen auf die Fläche des Targets (Total Power). Dieser Effekt scheint zudem deutlich mehr Einfluss zu nehmen, als die Flussdichteabweichungen, die in Abbildung 53 dargestellt sind. Die Flussdichten auf den Isolinien von FMAS liegen über denen von FATMES, aufgrund der festgestellten Unterschiede bei der Bildauflösung und -verzerrung sind diese Werte jedoch nicht repräsentativ. Die Lage der Isolinien ist nicht vergleichbar. Neben dem Fehler aufgrund der geringen Bildauflösung von 5,3 %, ist beim Messsystem FATMES somit ein weiterer Messfehler aufgrund des künstlichen Shadingbildes vorhanden, der nicht exakt bestimmt werden kann.

#### 4.4.3 Flussdichtemessung im Hochleistungsstrahler

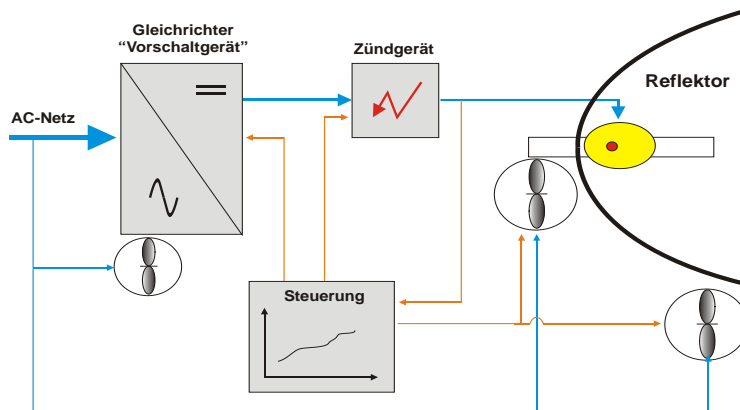
Der Aufbau des Targets und die Einmessprozedur gestalten sich wie in Kapitel 4.4.1 für den Sonnenofen beschrieben. Die Maße von Target und Apertur variieren zwischen verschiedenen Messungen. Exemplarisch zeigt Abbildung 57 das Messergebnis einer Lampe auf einem quadratischen Target mit einer Seitenlänge von 50 cm und einer kreisförmigen Apertur mit einem Durchmesser von 10 cm. Da die lambertsche Messenebene exakt im Brennpunkt des Strahlers positioniert ist, ergibt sich im Vergleich mit dem Sonnenofen (Abb. 50) ein sehr spitzes Flussdichteprofil mit dem größtmöglichen Maximalwert („Peak-Flux“) einer Lampe.



**Abb. 57:** Flussdichteprofil einer Lampe (HLS)

Die berechnete Leistung beträgt 2,46 kW auf dem Target und 1,64 kW auf der Apertur. Der gemessene Fluss auf dem Target muss aufgrund der Energieerhaltung mit der optischen Leistung (Strahlungsfluss) der eingesetzten Lampe übereinstimmen. Die

Form der Flussdichteverteilung nimmt darauf keinen Einfluss. Um den Strahlungsfluss einer Lampe angeben zu können, sind die beim Lampenbetrieb auftretenden Verluste zu quantifizieren. Die Wirkungsgrad-Verlustkette setzt sich aus den einzelnen Wirkungsgraden der in Abbildung 58 skizzierten Komponenten zusammen. Eine gewöhnliche Lampe des Hochleistungsstrahlers in Köln wird mit einer elektrischen Nennleistung von 6 kW über einen Gleichrichter betrieben.



**Abb. 58:** Blocksaltbild einer HLS-Lampe [19]

Folgende Angaben beziehen sich auf Untersuchungen des DLR im Rahmen der Planung des HLS [19]. Der Gleichrichter hat demnach einen Wirkungsgrad von 90 % und die Lampe weist 50 % Wärmeverluste auf. Der Reflexionsgrad der spiegelnden Fläche beträgt 90 %. Aufgrund von inhomogener Oberflächenbeschaffenheit und fertigungsbedingten Formabweichungen des Reflektors werden nicht alle von der Lampe emittierten Strahlen im 3 Meter entfernten Brennpunkt gebündelt. Diese Verlustart wird Spilling genannt und mindert den Strahlungsfluss in der Experimentebene um 15 %. Die optische Leistung einer einzelnen Lampe wird anhand dieser Angaben gemäß Formel (33) bestimmt.

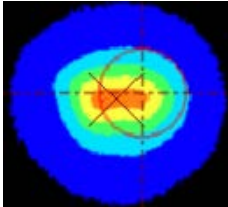
$$\Phi = P_{el} \cdot \eta_{\text{Gleichrichter}} \cdot \eta_{\text{Lampe}} \cdot \eta_{\text{Reflexionsgrad}} \cdot \eta_{\text{Spilling}} \quad (33)$$

$$\Phi_{6000} = 6 \text{ kW} \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 2,07 \text{ kW} \quad (34)$$

$$\Phi_{7000} = 7 \text{ kW} \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 2,41 \text{ kW} \quad (35)$$

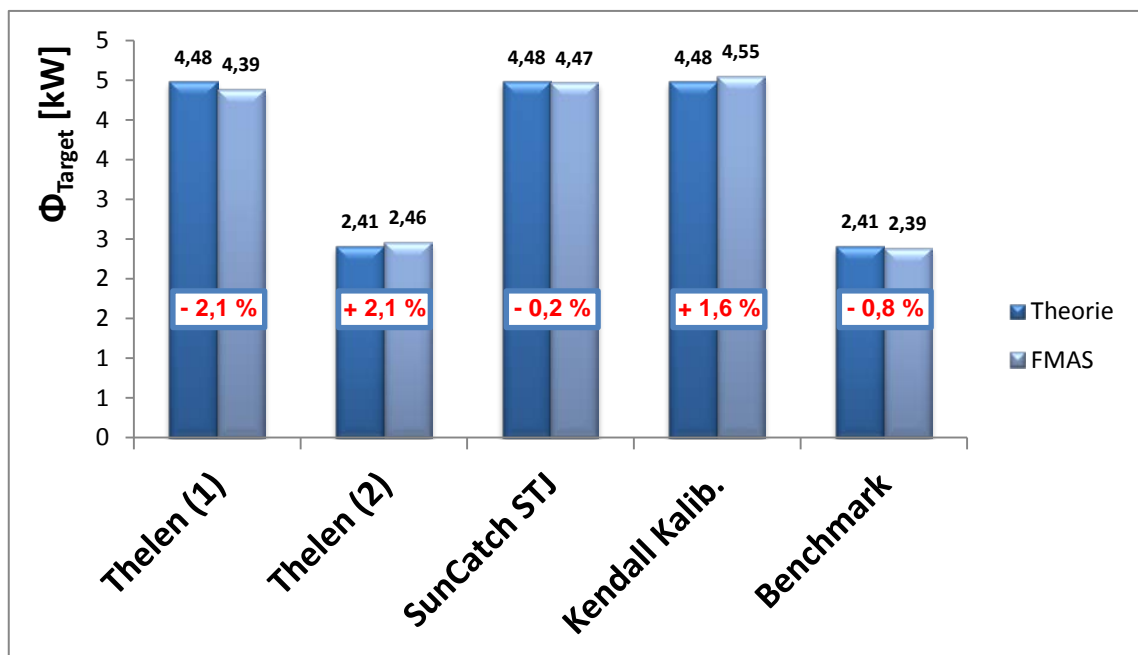
Aufgrund eines Benchmarks sind im HLS Köln zum Zeitpunkt der Messungen Lampen unterschiedlicher Hersteller verbaut, darunter auch drei Lampen mit 7 kW elektrischer Anschlussleistung. Gleichung (34) ergibt die optische Leistung einer Standard-Lampe mit 6000 W. Über die Beziehung (35) wird der Strahlungsfluss einer Benchmark-Lampe mit 7000 W ermittelt. Bei der in Abbildung 57 dargestellten Messung ist ein Strahler mit einer Nennleistung von 7 kW eingesetzt worden. Der gemessene Wert für die Leistung auf dem Target überschreitet den theoretischen Wert mit 2,46 kW um 2,1 %.

Eine weitere Messung mit zwei Lampen, deren Brennpunkte nebeneinander auf einer Waagerechten angeordnet sind, ergibt ein flacheres Profil (Abb. 59) mit einer Gesamtleistung auf dem Target von 4,39 kW. Eine der beiden Lampen entspricht dem HLS-Standard, die andere ist eine Benchmark-Lampe. Die theoretische Leistung ergibt sich durch Addition von  $\Phi_{6000}$  und  $\Phi_{7000}$  zu 4,48 kW. Das FMAS-Ergebnis dieser Messung unterschreitet den berechneten Wert damit um 2,1 %.



**Abb. 59:** Flussdichteprofil zweier Lampen (HLS)

Im Rahmen von drei weiteren, unabhängigen Messkampagnen ist die neue FMAS-Software ebenfalls eingesetzt worden. Abbildung 60 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Abweichungen aller fünf vorliegenden Messungen.



**Abb. 60:** berechneter und gemessener Strahlungsfluss (HLS)

Die mittlere, absolute Abweichung des Messsystems FMAS von den nach (33) berechneten Leistungen beträgt 1,4 %. Maximal weicht die Messung um  $\pm 2,1$  % von der Theorie ab. Der Gesamtfehler der Messkette, bestehend aus dem Sensor zur Kalibrierung (Kapitel 3.4) und der Messkamera, variiert je nach Sensortyp. Er liegt nach den Erkenntnissen im Hochleistungsstrahler bei  $\pm 2,4$  % (Kendall),  $\pm 2,6$  % (SUNCATCH) oder  $\pm 2,8$  % (Hycal).

## 4.5 Leistungsbestimmung einer UV-Lampe

Neben der Flussdichtemessung hochkonzentrierter Solarstrahlung wird FMAS auch für andere Anwendungen genutzt. Ein Experiment zur Ermittlung der UV-Beständigkeit einer Fugendichtmaße ist in Abbildung 61 dargestellt. Die UV-Lampe nimmt 2000 W elektrische Leistung auf und emittiert 490 W UV-A-Strahlung und 60 W UV-B-Strahlung.

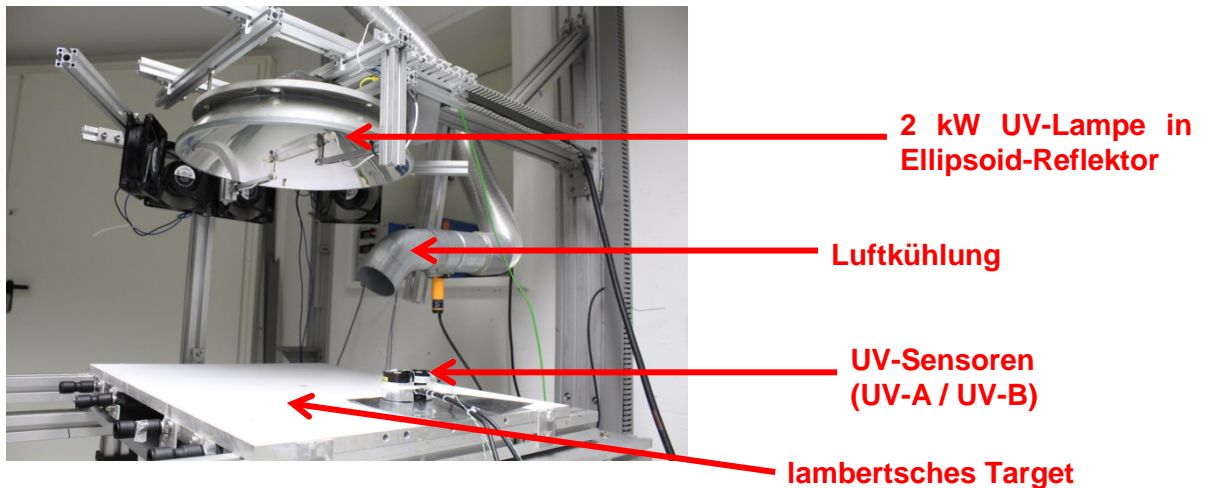


Abb. 61: Messaufbau UV-Lampe

Der elliptische Reflektor bündelt die Strahlleistung in Richtung der Proben. Der Test soll innerhalb kurzer Zeit eine Aussage über die Langzeitbeständigkeit des Materials gegen UV-Strahlung ermöglichen. Um eine homogen ausgeleuchtete Position unter dem Reflektor und die Leistungsdichte an dieser Position zu bestimmen, wird ein lambertsches Target im gleichen Abstand zur Lampe wie die Probenoberfläche ausgerichtet. In derselben Ebene befinden sich (anders als in Abbildung 61 dargestellt) zwei unterschiedliche Sensoren für UV-A- und UV-B-Strahlung zur Kalibrierung. Abbildung 62 zeigt die Flussdichteverteilung auf dieser Messebene. Anders als beim Hochleistungsstrahler ist das Spilling bedingt durch den Reflektor und die längliche Form der Lampe bei diesem Versuchsaufbau ausgeprägt.

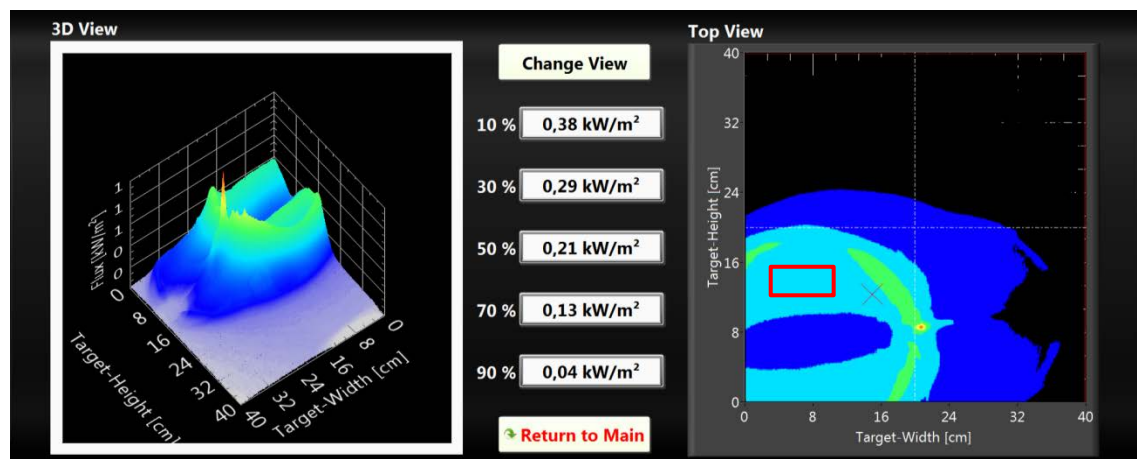
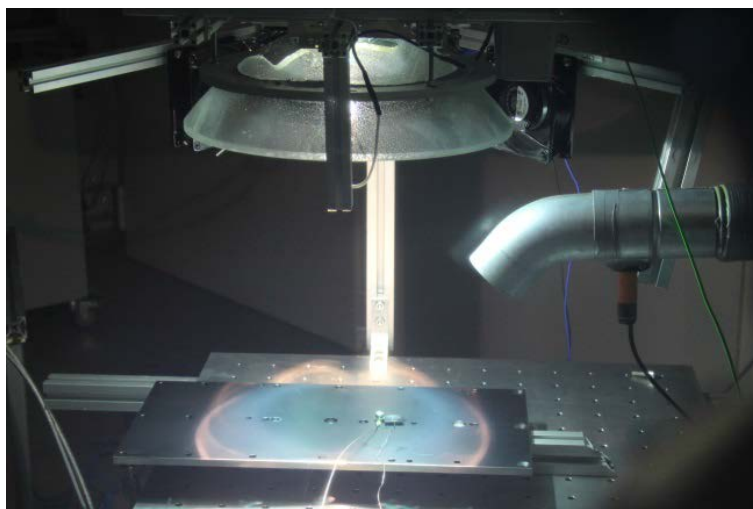


Abb. 62: Ergebnisse UV-Lampe

Senkrecht unter der Lampe trifft die Strahlung unmittelbar auf das Target, so dass die Flussdichte in diesem Bereich geringer ausfällt. Die emittierten Strahlen werden nicht am Reflektor gespiegelt und in Richtung der Proben konzentriert. Die Draufsicht zeigt links neben der Position des Schwerpunktes einen ausreichend großen Bereich mit annähernd homogener Flussdichte (Abb. 62, rotes Rechteck). In diesem werden vier Proben während des Langzeittests platziert und gleichzeitig bestrahlt.

Für die Planung des Experiments ist nicht die Gesamtleistung, sondern ausschließlich die Strahlungsflussdichte entscheidend. Aus diesem Grund wirkt sich die unvollständige Darstellung der Flussdichteverteilung nicht negativ aus. Um die Strahlungsflussdichten im Spektralbereich 315 nm bis 400 nm (UV-A) zu ermitteln, wird das aufgenommene Rohbild mit dem Signal des UV-A-Sensors skaliert. Das gleiche Bild dient ebenso der Auswertung für den Spektralbereich 280 nm bis 315 nm (UV-B) mit Hilfe des zweiten Sensors. Diese zweifache Auswertung wird durch die gleichmäßige Strahlungsinintensität aller emittierten Wellenlängen legitimiert. Der Mittelwert der UV-A-Flussdichte im Bereich der Proben beträgt  $414 \text{ W/m}^2$ , der UV-B-Mittelwert  $162 \text{ W/m}^2$ . Die gesamte Leistungsdichte an der gewählten Position beträgt aufsummiert  $576 \text{ W/m}^2$ . Aufzeichnungen der Wetterstation des DLR am Standort Köln lassen auf natürliche UV-Flussdichten von bis zu  $42 \text{ W/m}^2$  an sonnigen Tagen schließen (UV-A und UV-B).



**Abb. 63:** UV-Experiment im Betrieb

Als Quotient der Leistungsdichten aus der FMAS-Messung und der Wetterstation ergibt sich ein Beschleunigungsfaktor von maximal 13. Eine Stunde Bestrahlung entspricht dreizehn Stunden UV-Belastung bei vergleichbaren Wetterverhältnissen wie am DLR-Standort Köln.



## 5 Fazit und Ausblick

Das im Rahmen dieser Master Thesis entwickelte Messsystem FMAS zur Bestimmung der Leistungsdichte optischer Strahlung wird das vorhandene Messsystem FATMES beim DLR-Institut für Solarforschung zum Ende des ersten Quartals 2016 vollständig ersetzen. Aus den Messungen zur Validierung im Hochleistungsstrahler lässt sich ein systembedingter Messfehler unter  $\pm 3 \%$  ableiten. Die Ergebnisse aus den Vergleichsmessungen im Sonnenofen deuten außerdem auf eine Steigerung der Messgenauigkeit gegenüber FATMES hin. Aufgrund der geringeren Pixeldichte der alten Messkameras sind Messabweichungen von bis zu 5,3 % festgestellt worden. Weitere Ungenauigkeiten von bis zu 5 % werden in der Shadingkorrektur mit Hilfe eines künstlichen Bildes vermutet. Folgende Gegenüberstellung zeigt einen Vergleich der beiden Messsysteme anhand ausgewählter Merkmale.

**Tab. 7:** Systemvergleich

<b>Merkmal</b>	<b>FATMES</b>	<b>FMAS</b>
Bildauflösung	262.144 Pixel	1.000.000 Pixel
Mobilität	nur zentrale Nutzung	zentrale & dezentrale Nutzung
Performance / Bildauswertung	ca. 10 Minuten / Messung	ca. 1 Minute / Messung
Messdaten	Bildschirmanzeige	transportable Daten (bmp / csv)
Rechner- Technologie	VAX (1977)	handelsüblicher PC / Laptop
Kamera- Schnittstellen	BNC / Chinch	GigE / Ethernet-Standard
Bedienung	Tastatur	Maus und Tastatur
Algorithmen	teilweise intransparent	selbst implementiert

Die Zeitangaben zur Performance beziehen sich auf Online-Messungen mit Sensor, der zugehörigen Einmessprozedur durch den Bediener und die Anwendung der Korrekturmechanismen zur Auswertung. Das Markieren der Passpunkte mit der Tastatur und die Eingaben zu den Abmessungen erfordern bei FATMES einen wesentlich höheren Zeitaufwand als bei FMAS. Die Bildentzerrung ist bei beiden Messsystemen der rechenintensivste Teil und nimmt beim alten System etwa 3 Minuten in Anspruch. Die neue Software löst das Gleichungssystem in weniger als 1 Sekunde.

Die auf LabVIEW basierende FMAS-Software erfüllt sämtliche in Kapitel 4.1 beschriebenen Mindestanforderungen, um den bisherigen Betrieb der Großanlagen aufrechterhalten zu können. Darüber hinaus ermöglicht die Portabilität von FMAS Messungen außerhalb des Sonnenofens und des Hochleistungsstrahlers. Die Qualifizierung der



Module für den neuen Hochleistungsstrahler am DLR-Standort Jülich ist mit dem neuen Messsystem vor Ort durchführbar. Ebenso konnte die Kalibrierung des in Kapitel 4.5 geschilderten UV-Versuchs an einem dezentralen Standort erfolgen. Dieses erfolgreich abgeschlossene Experiment zeigt die Eignung von FMAS für weitere Anwendungsgebiete. Der Wirkungsgrad von Leuchtmitteln für den Automobilbereich könnte mit Hilfe des Messsystems ermittelt werden, indem die elektrische Leistung mit der optischen Leistung ins Verhältnis gesetzt würde. Durch Variation der Entfernung zwischen Target und Scheinwerfer erlaubt FMAS Aussagen über Intensitätsverluste und ausgeleuchtete Bereiche. Die reine Visualisierung der Intensitätsverteilung von Leuchtmitteln wäre ebenfalls ein Einsatzgebiet für die Software. So könnte beispielsweise die Ausleuchtung von Arbeitsplätzen, Aquarien oder Terrarien geplant und optimiert werden.

Für den Einsatz beim DLR als Messsystem für hochkonzentrierte Solarstrahlung haben sich während dessen Entstehung wünschenswerte Zusatzfunktionen ergeben. Das manuelle Eintragen von Gain-Faktoren bei einer Offline-Messung ohne Sensor sollte nach einer Systemkalibration ohne Nutzereingriff erfolgen. Dazu müssen Messungen mit sämtlichen Blendeneinstellungen und Filterkombinationen der jeweiligen Messkamera durchgeführt werden, um die zugehörigen Verstärkungsfaktoren zu ermitteln. Diese würden in der Software durch Angabe der Blende und der Neutraldichte selbsttätig erkannt und zur Skalierung genutzt. Ein weiterer Punkt zur Verbesserung besteht in der automatischen Erkennung des Wertebereichs der Ergebnisse. Die Angabe in kW auf dem Ergebnisbildschirm hat sich bei dem UV-Experiment als ungünstig herausgestellt. Der Nutzer muss den genauen Wert aus der csv-Messdatei lesen. Dort steht der Messwert mit sechs Nachkommastellen. Bei Messwerten unter 1 kW sollten die Leistungen und Flussdichten auf dem Ergebnisbildschirm deshalb in der Einheit Watt angezeigt werden. Der Ergebnisbildschirm in Abbildung 64 verdeutlicht eine weitere Anpassung, die während einer Messung am Hochleistungsstrahler vorgeschlagen wurde.

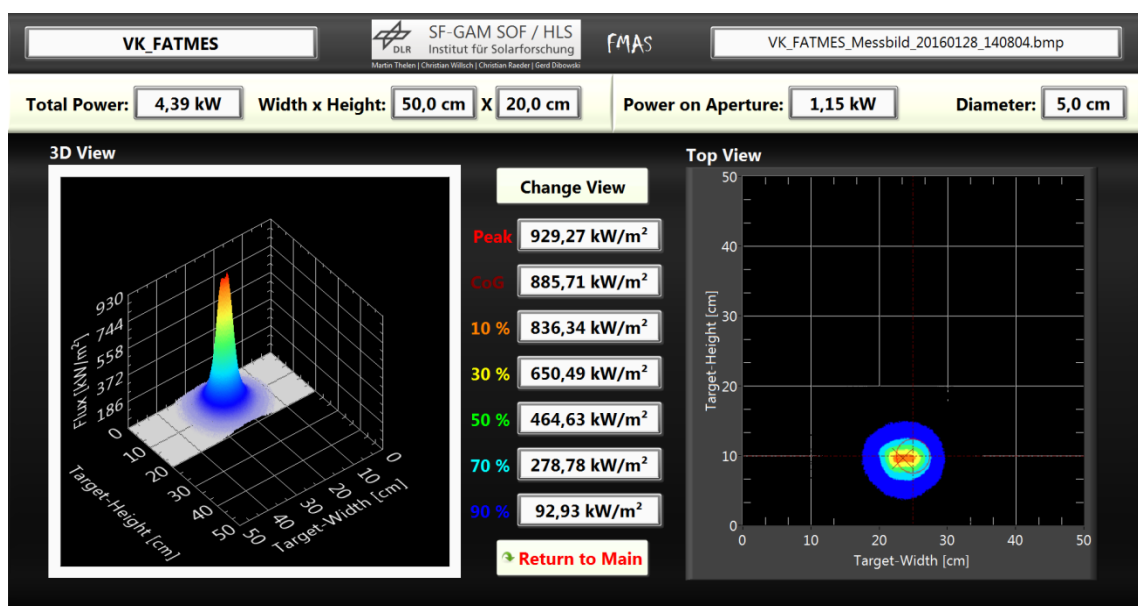


Abb. 64: Optimierung des FMAS-Ergebnisbildschirms

Neben den vorhandenen Anzeigen für die Flussdichten auf den Isolinien erscheinen nun Werte zur Anzeige der maximalen Flussdichte (Peak) und der Flussdichte im Schwerpunkt (CoG – Center of Gravity). Zudem werden die Beschriftungen dieser Anzeigen in den entsprechenden Farben wie in den Graphen dargestellt.

Eine aufwendigere Erweiterung von FMAS besteht in der Messung mit einem Schwenk-Target. Bisher ist FMAS nur in der Lage, die Flussdichteverteilung auf einem fest stehenden Target zu messen. Die Messungen werden stets vor dem Aufbau der Experimente durchgeführt. Im Sonnenofen und Hochleistungsstrahler bestünde die Möglichkeit, aufgebaute Experimente wie Reaktoren unter Bestrahlung zu verfahren. In beiden Großanlagen befinden sich diese auf steuerbaren 3-Achs-Tischen. Würde das Experiment aus der gemessenen Ebene nach hinten verfahren, könnte ein Target in dieser Ebene eingeschwenkt werden. Auf der lambertschen Fläche des Schwenk-Targets würde dann im laufenden Betrieb eine Flussdichtemessung erfolgen, ohne eine nennenswerte Unterbrechung zu erfordern. Um dies möglichst effizient umzusetzen, sollte die Motorsteuerung des Schwenk-Targets in die FMAS-Software eingebunden werden. Eine Synchronisation der Motorposition mit dem Befehl zum Auslösen der Messkamera ermöglicht die Messung zum korrekten Zeitpunkt.

## Anhang A1 (Kamera)

Basler piA1000-48gm				
Item	Symbol	Typ. <sup>1</sup>	Unit	Remarks
Temporal Noise Parameters				
Total Quantum Efficiency (QE)	$\eta$	35	%	$\lambda = 545 \text{ nm}$
Inverse of Overall System Gain	$\frac{1}{K}$	6.2	$\frac{e^-}{DN}$	
Temporal Dark Noise	$\sigma_{d0}$	37	$e^-$	
Saturation Capacity	$\mu_{e.sat}$	23800	$e^-$	
Derived Parameters				
Absolute Sensitivity Threshold	$\mu_{p.min}$	107	$p^\sim$	$\lambda = 545 \text{ nm}$
Dynamic Range	$DYN_{out.bit}$	9.3	bit	
Maximum SNR	$SNR_{y,max.bit}$	7.3	bit	
	$SNR_{y,max.dB}$	43.8	dB	
Item	Symbol	Typ.	Unit	Remarks
Spatial Noise Parameters				
Spatial Offset Noise, $DSNU_{1288}$	$\sigma_o$	10.1	$e^-$	
Spatial Gain Noise, $PRNU_{1288}$	$S_g$	1.5	%	

Table 1: Most Important Specification Data

Operating Point		
Item	Symbol	Remarks
Video output format		12 bits/pixel(Mono16)
Gain	Register raw	0
Offset	Register raw	100
Exposure time	$T_{exp}$	40.0 $\mu s$ to 40.0 ms

Table 2: Operating Point for the Camera Used

1

<sup>1</sup> Auszug aus dem Datenblatt:

[http://s.baslerweb.com/media/documents/BD00042501\\_Basler\\_piA1000-48gm\\_EMVA\\_Standard\\_1288-1.pdf](http://s.baslerweb.com/media/documents/BD00042501_Basler_piA1000-48gm_EMVA_Standard_1288-1.pdf) (Zugriff am 11.02.2016)

Basic Information	
Vendor	Basler
Model	piA1000-48gm
Type of data presented	Typical
Number of samples	15
Sensor	KAI-1020
Sensor type	CCD
Sensor diagonal	Diagonal 11 mm , Optical Size 2/3"
Indication of lens category to be used	C-Mount
Resolution	1004 x 1004 pixel
Pixel width	7.40 $\mu\text{m}$
Pixel height	7.40 $\mu\text{m}$
Readout type	Progressive scan
Transfer type	Interline transfer
Shutter type	-
Overlap capabilities	Overlapping
Maximum frame rate	48 frames/second
General conventions	-
Interface type	Gigabit Ethernet

Table 3: Basic Information

2

---


<sup>2</sup> Auszug aus dem Datenblatt:

[http://s.baslerweb.com/media/documents/BD00042501\\_Basler\\_piA1000-48gm\\_EMVA\\_Standard\\_1288-1.pdf](http://s.baslerweb.com/media/documents/BD00042501_Basler_piA1000-48gm_EMVA_Standard_1288-1.pdf) (Zugriff am 11.02.2016)

## Anhang A2 (Objektiv SOF)

**AF Zoom-Nikkor 24-50mm f/3.3-4.5D (2.1x)**

**FX**  
Format



**Key Features**

- Compact and lightweight
- Nikon Super Integrated Coating for minimized flare and ghost, providing good color balance
- Focuses down to 0.5m

**Specifications**

Focal length	24, 35, 50mm
Maximum aperture	
Minimum aperture	
Lens construction	9 elements in 9 groups
Picture angle	84° - 46° [61° - 31°30' with Nikon digital cameras (Nikon DX format)]
Closest focusing distance	0.6m (0.5m at 50mm focal length and macro setting)
Maximum reproduction ratio	1/10.6 (1/8.5 at 50mm focal length and macro setting)
No. of diaphragm blades	7
Filter/attachment size	
Diameter x length (extension from the camera's lens-mount flange)	67.5x74.1 mm
Weight	355g
Supplied accessories	62mm snap-on front lens cap, Rear lens cap LF-1

3

### <sup>3</sup> Hersteller-Webseite:

[http://imaging.nikon.com/lineup/lens/zoom/normalzoom/af\\_zoom24-50mmf\\_33-45d/](http://imaging.nikon.com/lineup/lens/zoom/normalzoom/af_zoom24-50mmf_33-45d/) (Zugriff am 11.02.2016)

## Anhang A3 (Objektiv HLS)



### Anti-Shading Lens

#### Apo-Xenoplan 2.0/20-0003

These high-resolution, high-speed lenses are optimized for the use of 4 and 8 megapixel 1.3" sensors with micro-lenses on the sensor surface. The special optical design prevents unwanted shading on the sensor. This makes it much easier to combine a homogeneous luminance distribution with high imaging performance. The image circles are very large for C-Mount lenses. With a 1.3" sensor, the relatively short focal lengths allow a large coverage range at a short working distance. The lenses are also broadband coated and can be used in the visible range 400 – 700 nm or the near infrared range 700 – 1000 nm.



Apo-Xenoplan 2.0/20

#### Key Features

- Anti-shading for sensor sizes up to 1.3"(image circle 24 mm)
- Designed for 4 and 8 Mpix sensors with micro-lenses
- High resolution optics 400 - 700 nm (VIS) / 700 - 1000 nm (NIR)
- Very high MTF across the entire sensor
- Robust mechanics for industrial environment
- Compact and low weight
- Focus and iris setting lockable

#### Applications

- Machine Vision and other imaging applications
- 3D measurement
- Traffic
- Etc.

#### Technical Specifications

F-number	2.0
Focal length	20.5 mm
Image circle	24 mm
Transmission	400 - 1000 nm
Interface	C-Mount
Weight	450 gr.
Filter tread	M35.5 x 0.5
Code no.	1056472

4

#### <sup>4</sup> Auszug aus dem Datenblatt:

[http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user\\_upload/bu\\_industrial\\_solutions/industrioptik/22mm\\_Lenses/4\\_8\\_Megapixel\\_Anti\\_Shading/Apo-Xenoplan\\_2.0-20.pdf](http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_industrial_solutions/industrioptik/22mm_Lenses/4_8_Megapixel_Anti_Shading/Apo-Xenoplan_2.0-20.pdf) (Zugriff am 11.02.2016)

## Anhang A4 (Motortreiber Filterrad)

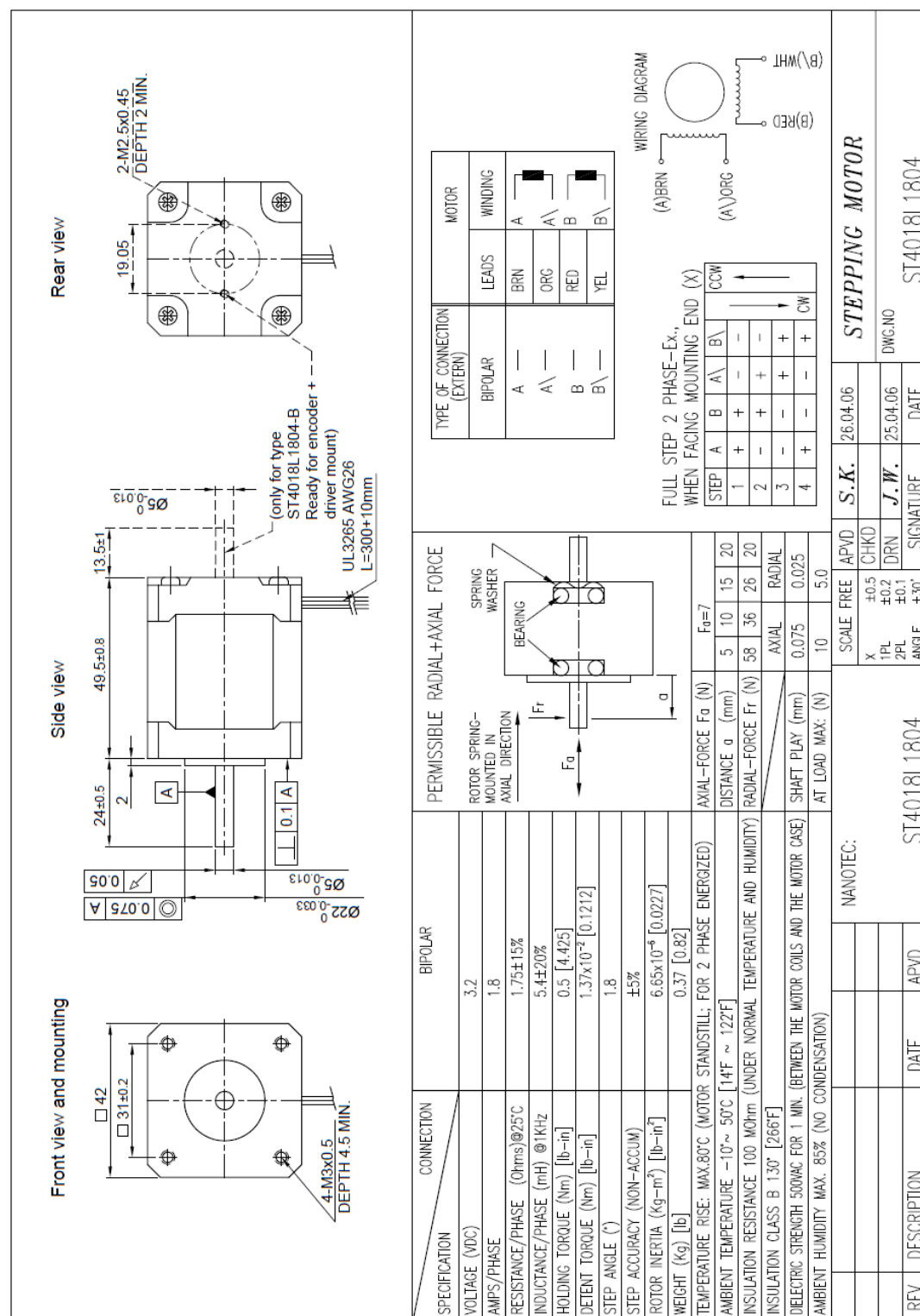
Specification	
<b>Mechanical</b>	
Dimensions (W x H x D)	72 x 127 x 110 mm; 90 x 127 x 110 mm with attached USB converter or terminal adaptor
Weight	Approx. 950 g
Mounting	Wall- or rail mounting
<b>Features</b>	
Stepper motors	Suitable for the control of 2 phase stepper motors with 4, (6) or 8 lead wiring
Supply voltage	Controller and motor: 24 to 48 V <sub>DC</sub> ; Limit switches and outputs: 24 V <sub>DC</sub>
Phase current	Up to 3.5 A <sub>PEAK</sub>
Step resolution	1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/20; for smoother motor rotation: 1/32, 1/64, 1/128 up to 1/256 step of a full step
Step frequency	40,000 steps/sec
Hardware error detection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Short circuit (between phase and power supply; between both phases; within a motor against ground))</li> <li>• Over temperature</li> <li>• Undervoltage</li> </ul>
Cable length	Motor: shielded: 50 m max. Signal: shielded: 100 m max.
Diagnostic LEDs	Ready, busy, error
Operating mode	"Remote" - via bus; "Local" - stand-alone mode with sequence program
<b>Interfaces</b>	
Analogue outputs	2 x (A, B, C, D) for two 2 phase stepper motors
Digital outputs	8 digital outputs, overload-proof, each electrically isolated from power supply / 24 V power supply fed separately; the maximum load is 1 A on each output; 4 A for all outputs
Host interface	Optional: Ethernet, USB, Profibus, RS 485, RS 232
Analogue inputs	2 x 10 Bit AD converter e. g. for a joystick. The joystick power (5 V <sub>DC</sub> ; 100 mA max.) is provided by the controller
Digital inputs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 digital inputs, electrically isolated, 24 V input level</li> <li>• 4 limit switches: type PNP NCC or NOC</li> <li>• 2 encoders for optional differential incremental encoder or SSI absolute encoder; provided by the controller (5.3 V<sub>DC</sub>, max. 200 mA)</li> <li>• 2 Motor Enable</li> </ul>
<b>Communication and Programming</b>	
Programming	MiniLog format acc. to DIN 66025 – MiniLog-Comm® (included in delivery) – LabVIEW® VIs (included in delivery)
Memory	128 kB program memory
<b>Operating Conditions</b>	
Temperatures	Operation: +5 to +50 °C; storage and transport: -10 to +85 °C
Degree of pollution	Level 2
Relative humidity	5 to 85 %, class 3K3 non-condensing
Protection class	IP 20
EMC immunity/ EMC emission	Acc. EN 61000-3-2 Acc. EN 61000-6-1, -3, -4 Acc. EN 6100-4-2...6, -11
Approval	CE

5

<sup>5</sup> Auszug aus dem Datenblatt:

[ftp://ftp.phytron.de/datasheets/stand-alone\\_systems/mcc-2-en.pdf](ftp://ftp.phytron.de/datasheets/stand-alone_systems/mcc-2-en.pdf) (Zugriff am 11.02.2016)

## Anhang A5 (Schrittmotor Filterrad)



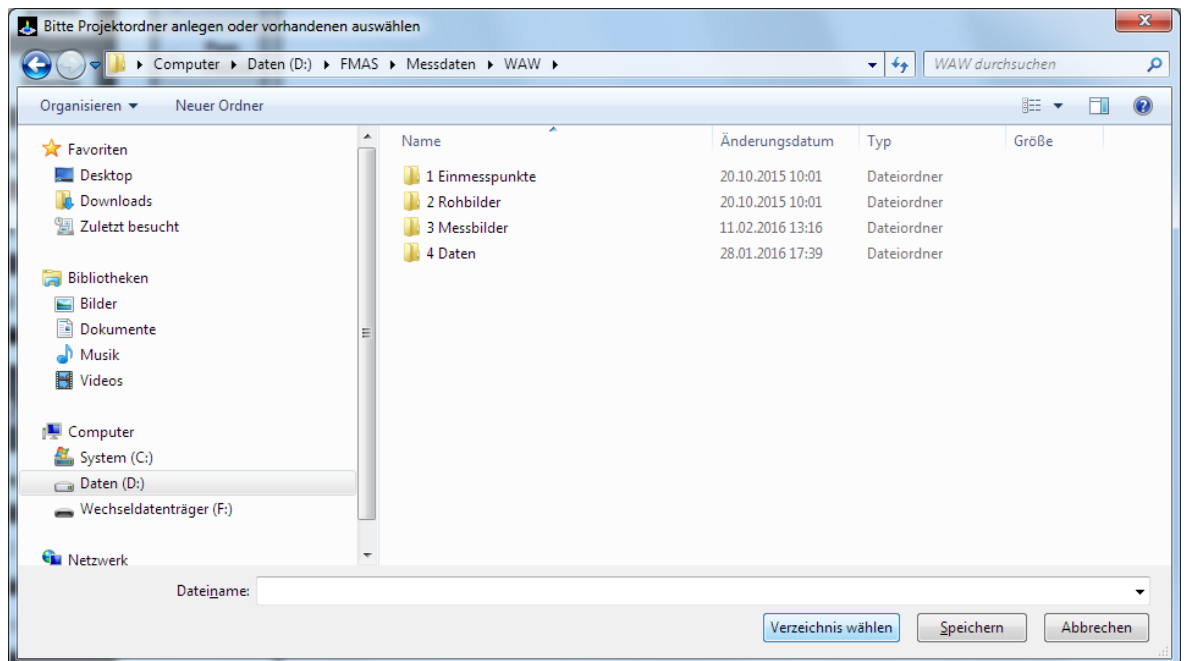


## Anhang A6 (FMAS-Messung Schritt für Schritt)

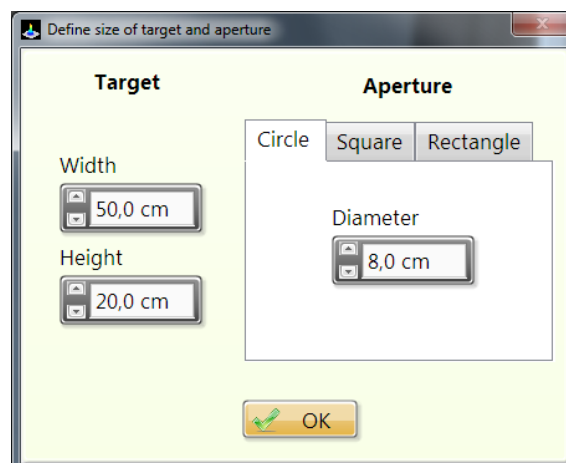
### 1. Erforderliche Eingaben nach Programmstart



#### 1.1. Auswahl der Kamera

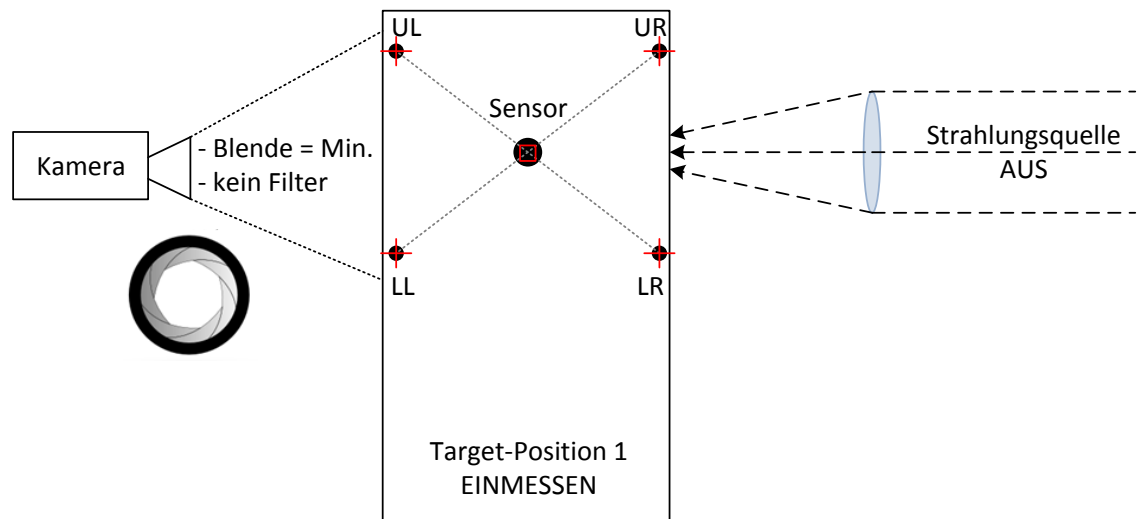


#### 1.2. Auswahl des Projektordners (neu oder vorhanden)



#### 1.3. Eingabe der Maße für Target und Apertur

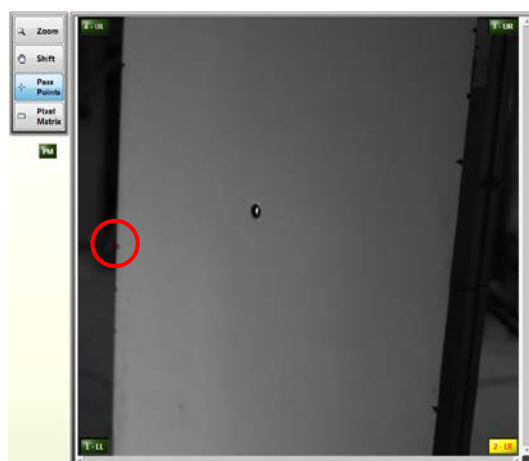
## 2. Einmessprozedur (Online-Messung mit Sensor)



### 2.1. Kamerablende geöffnet, ohne ND-Filter



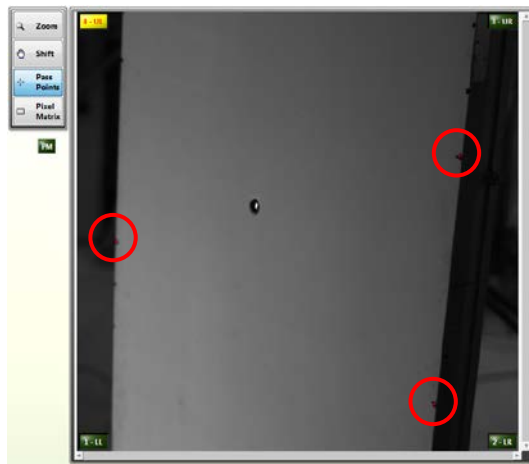
### 2.2. Live-Bild-Darstellung ohne Markierungen, Passpunkt unten links markieren



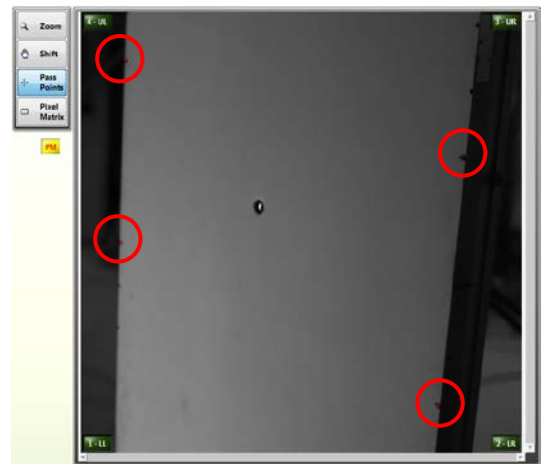
2.3. Passpunkt unten rechts markieren



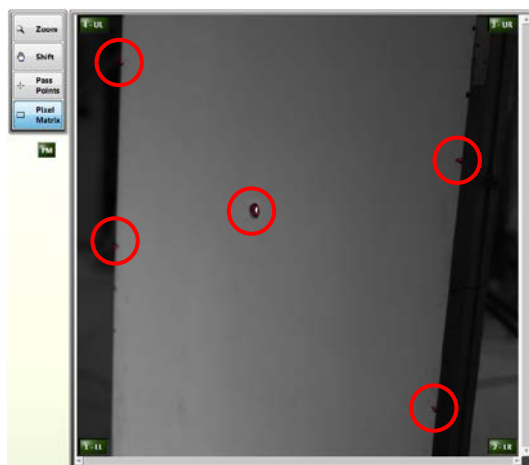
2.4. Passpunkt oben rechts markieren



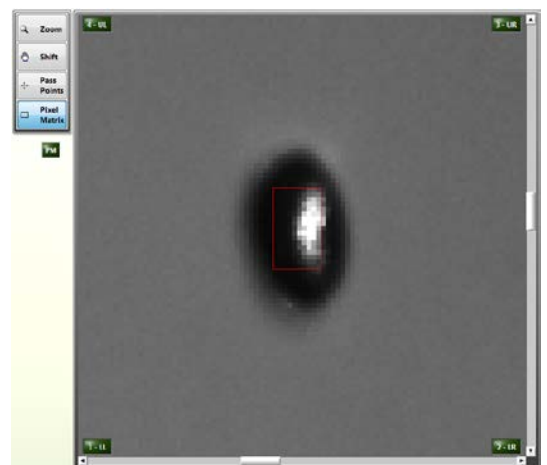
2.5. Passpunkt oben links markieren



2.6. Pixelmatrix auf Sensor markieren

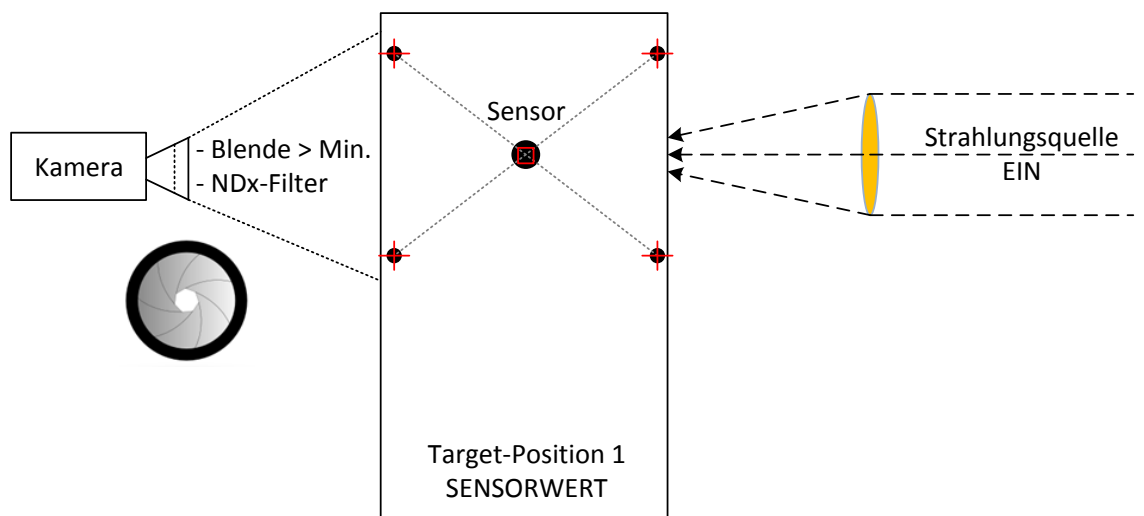


2.7. Markierungen gesetzt

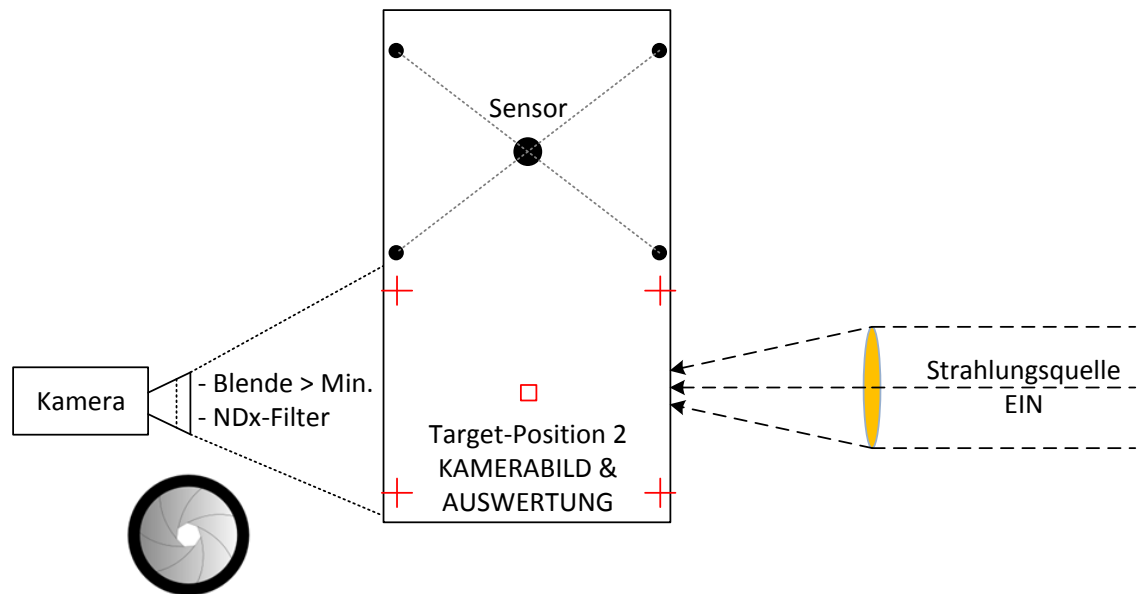


Optional: Zoom-Ansicht (Sensor)

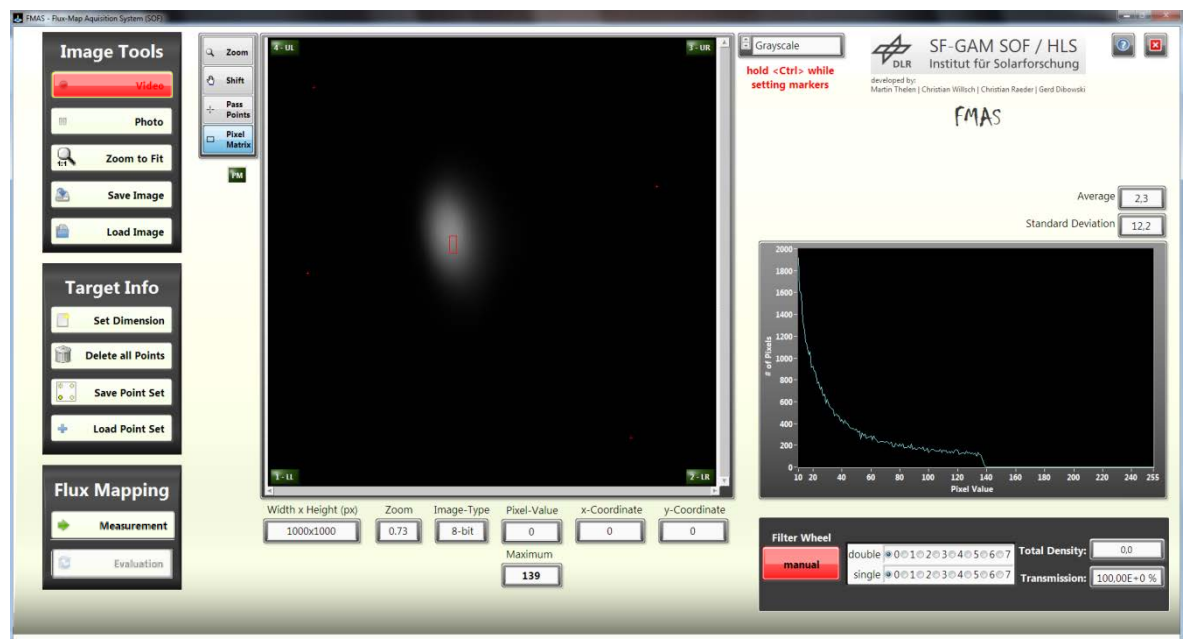
### 3. Messung



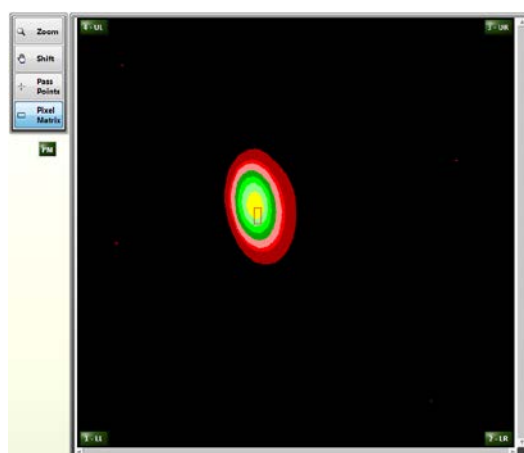
3.1. Kamerablende und ND-Filter je nach Strahlung einstellen  
Sensorwert [ $\text{kW/m}^2$ ] unter Bestrahlung notieren



### 3.2. Target-Position 2 anfahren

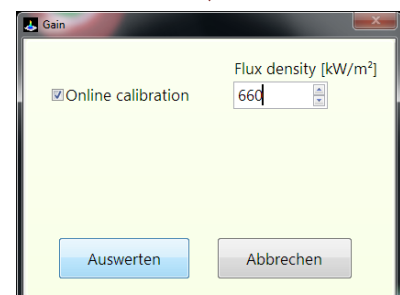


### 3.3. Live-Bild-Darstellung mit Markierungen unter Bestrahlung



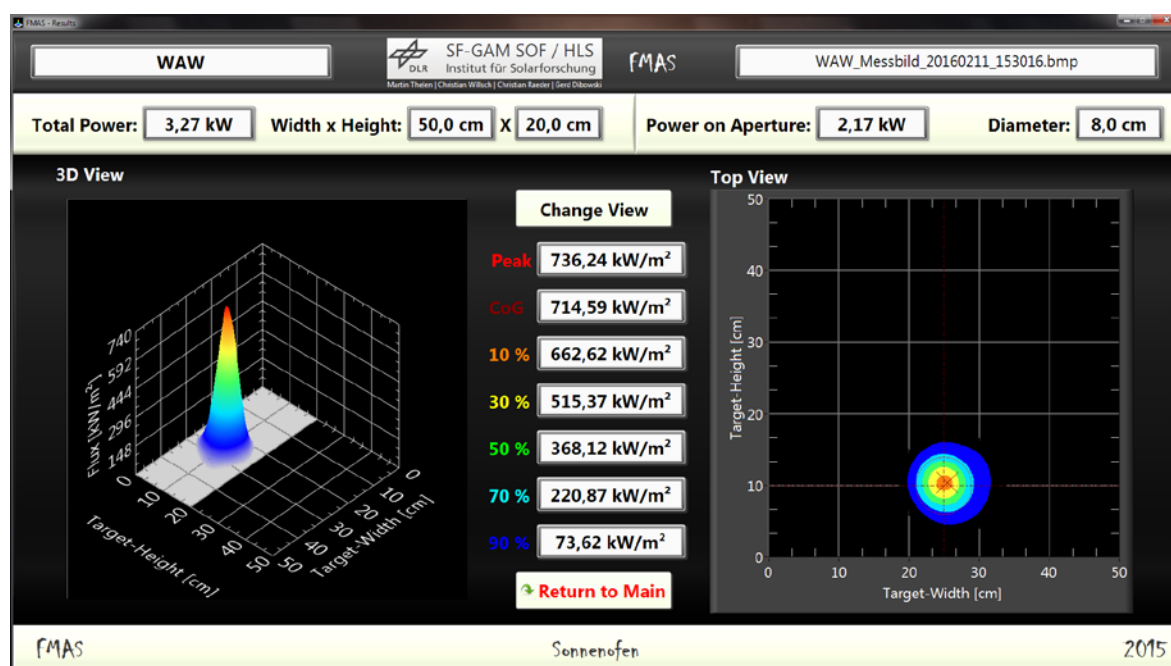
Optional: Darstellung mit 15 Farben

Measurement

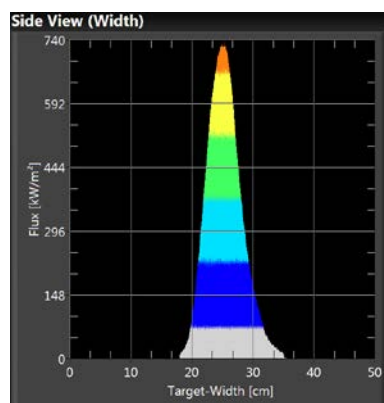


### 3.4. Flussdichte eingeben

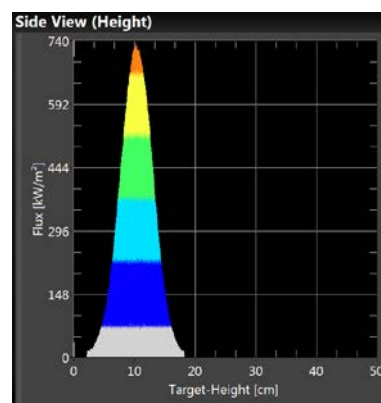
#### 4. Sichtung der Ergebnisse



##### 4.1. Ergebnis-Bildschirm mit 3D-Ansicht (Standard)



Optional: Seitenansicht über Breite



Optional: Seitenansicht über Höhe

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Projekt	Kamera	Blende	Filter	optische Dic	Transmissio	Gain	Rohbild	Messbild	LLx	LLy	LRx	LRy	URx	URy
2	MetRec_Star	FullHD_cam:5_6		ND3,0/1,8/0,	5,7	0,0002	8,263092	MetRec_Star	MetRec_Star	633	704	877	718	890	2
3															
4	Total Power	Flux on Targ	Power on Ap	Flux on Aper	Aperturform	Durchmesser		Schwerpunkt	Schwerpunkt	Schwerpunkt_Flux					
5	9,880798	104,0084	3,317857	862,12799	Kreis	7		199	135	1198,1483					
6															
7	Target-Breite [cm]														
8	0	0,093284	0,186567	0,279851	0,373134	0,466418	0,559701	0,652985	0,746269	0,839552	0,932836	1,026119	1,119403	1,212687	1,305
9															
10															
11	Target-Höhe [cm]														
12	0	0,093366	0,186732	0,280098	0,373464	0,46683	0,560197	0,653563	0,746929	0,840295	0,933661	1,027027	1,120393	1,213759	1,3071
13															
14	Flussdichte-Matrix [kW/m²]														
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

##### 4.2. Messdaten als csv-Datei in Excel (Ausschnitt)

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Übersicht der Arbeitspakete .....	2
<b>Abb. 2:</b> Elektromagnetisches Wellenspektrum [1] .....	3
<b>Abb. 3:</b> Skizze des Sonnenofens beim DLR in Köln [3] .....	5
<b>Abb. 4:</b> Direkt- und Diffus-Strahlung [4] .....	6
<b>Abb. 5:</b> solares Spektrum außerhalb und auf der Erde [5] .....	7
<b>Abb. 6:</b> Foto des Sonnenofens beim DLR in Köln [3] .....	7
<b>Abb. 7:</b> Blick auf den Konzentrator mit 159 Hohlspiegeln [3] .....	8
<b>Abb. 8:</b> HLS des DLR in Köln-Porz [3] .....	8
<b>Abb. 9:</b> Seitenansicht einer HLS-Lampe [3] .....	9
<b>Abb. 10:</b> Niveaufspaltung [2] .....	10
<b>Abb. 11:</b> Solarturm Jülich (Luftaufnahme) .....	11
<b>Abb. 12:</b> Blick auf Hauptreceiver und Forschungsebene des STJ vom Heliostatfeld ...	11
<b>Abb. 13:</b> Schaltschrank .....	12
<b>Abb. 14:</b> Bedienoberfläche von FATMES .....	13
<b>Abb. 15:</b> lambertsches Kosinusgesetz (li.: Strahldichte L; re.: Strahlstärke I) [7] .....	14
<b>Abb. 16:</b> Ladungsverschiebung im CCD-Chip [8] .....	16
<b>Abb. 17:</b> Kameraobjektiv [9] .....	17
<b>Abb. 18:</b> Blenden im Kameraobjektiv [10] .....	18
<b>Abb. 19:</b> Grauwerte von 0 bis 255 (8-bit) .....	19
<b>Abb. 20:</b> Ränder der Flussdichteverteilung .....	21
<b>Abb. 21:</b> Messaufbau zur optischen Flussdichtebestimmung .....	23
<b>Abb. 22:</b> Radiometer Gardon (Schnitt) .....	25
<b>Abb. 23:</b> Wärmetransfer im Kendall-Radiometer .....	26
<b>Abb. 24:</b> Kalorimeter SUNCATCH [14] .....	28
<b>Abb. 25:</b> Hauptkomponenten von FMAS .....	30
<b>Abb. 26:</b> Messkamera Basler piA1000-48gm [15] .....	32
<b>Abb. 27:</b> Kamera mit Objektiv und ND-Filtern (HLS) .....	33
<b>Abb. 28:</b> Filterrad-Kamera (SOF) .....	33
<b>Abb. 29:</b> Shadingbilder Basler-Kamera piA1000-48gm .....	35
<b>Abb. 30:</b> Filterrad-Steuerung FATMES .....	36
<b>Abb. 31:</b> Schrittmotorsteuerung Phytron MCC2 32-48 mini .....	36
<b>Abb. 32:</b> Blockdiagramm (Code) und Frontpanel (GUI) [16] .....	38
<b>Abb. 33:</b> Zusammenfassung von LabVIEW-Code in Sub-VIs .....	39
<b>Abb. 34:</b> FMAS – Bedienoberfläche .....	42
<b>Abb. 35:</b> FMAS – Bedienoberfläche im Wartemodus .....	43
<b>Abb. 36:</b> FMAS – Ergebnisbildschirm .....	44
<b>Abb. 37:</b> Projekt-Explorer „FMAS.lvproj“ .....	45
<b>Abb. 38:</b> Ordnerstruktur FMAS .....	46
<b>Abb. 39:</b> Grundgerüst des Quellcodes .....	47
<b>Abb. 40:</b> Dialog „Kameraauswahl“ .....	49
<b>Abb. 41:</b> Dialog "Target und Apertur" .....	49
<b>Abb. 42:</b> Filterradmodi (nur Sonnenofen-Version) .....	51

<b>Abb. 43:</b> Dialog "Bildauswertung Online" .....	56
<b>Abb. 44:</b> Dialog "Bildauswertung Offline" .....	58
<b>Abb. 45:</b> Korrekturmechanismen.....	61
<b>Abb. 46:</b> Target mit markierten Passpunkten .....	62
<b>Abb. 47:</b> Messung des Akzeptanzwinkels [3] .....	63
<b>Abb. 48:</b> Bilineare Interpolation [17] .....	64
<b>Abb. 49:</b> Strahlungsleistung FMAS (SOF).....	68
<b>Abb. 50:</b> Messdaten FMAS bei Shutteröffnung 100 % (SOF).....	69
<b>Abb. 51:</b> Messdaten FATMES bei Shutteröffnung 14 % (SOF) .....	70
<b>Abb. 52:</b> Vergleichsmessung FATMES vs. FMAS (SOF) .....	70
<b>Abb. 53:</b> Flussdichte-Vergleich FATMES / FMAS (SOF).....	71
<b>Abb. 54:</b> Auflösung der Passpunkte.....	72
<b>Abb. 55:</b> Einfluss der projektiven Entzerrung .....	73
<b>Abb. 56:</b> Auflösung von Kanten .....	74
<b>Abb. 57:</b> Flussdichteprofil einer Lampe (HLS).....	75
<b>Abb. 58:</b> Blockschaltbild einer HLS-Lampe [19] .....	76
<b>Abb. 59:</b> Flussdichteprofil zweier Lampen (HLS) .....	77
<b>Abb. 60:</b> berechneter und gemessener Strahlungsfluss (HLS).....	77
<b>Abb. 61:</b> Messaufbau UV-Lampe .....	78
<b>Abb. 62:</b> Ergebnisse UV-Lampe.....	78
<b>Abb. 63:</b> UV-Experiment im Betrieb .....	79
<b>Abb. 64:</b> Optimierung des FMAS-Ergebnisbildschirms.....	81

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Kenngrößen optischer Strahlung (vgl. [2]) .....	4
<b>Tab. 2:</b> Filterradbestückung im Sonnenofen .....	35
<b>Tab. 3:</b> Pinbelegung Schrittmotorsteuerung .....	37
<b>Tab. 4:</b> Schleifentunnel und Schieberegister .....	48
<b>Tab. 5:</b> Buttons der Bedienoberfläche .....	50
<b>Tab. 6:</b> Buttons des Ergebnisbildschirms .....	66
<b>Tab. 7:</b> Systemvergleich.....	80



## Quellenverzeichnis

- [1] Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, „Elektromagnetisches Spektrum und sichtbares Licht,“ [Online]. Available: [http://www3.hhu.de/biodidaktik/Fotosynthese\\_neu/dateien/licht/licht.html](http://www3.hhu.de/biodidaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/licht.html). [Zugriff am 13 10 2015].
- [2] M. Scholl und U. Russek, Skript zur Vorlesung Lasermaterialbearbeitung, Rheinische Fachhochschule Köln, WS 2014/15.
- [3] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Solarforschung, Köln, 2015.
- [4] SoDa Solar Radiation Data, [Online]. Available: [www.soda-is.com](http://www.soda-is.com). [Zugriff am 19 11 2015].
- [5] Wikimedia, „File:Sonne\_Strahlungsintensitaet.svg,“ [Online]. Available: [commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org). [Zugriff am 20 11 2015].
- [6] C. Gerthsen und H. Vogel, Physik, Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [7] L. Bergmann und Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 - Optik, Berlin: Walter de Gruyter & Co., 1993.
- [8] H.-P. Bähr und T. Vögtle, Digitale Bildverarbeitung - Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, Heidelberg: H. Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, 1998.
- [9] STEMMER IMAGING GmbH, 2010.
- [10] A. Pratzner, „Foto-Kurs.com,“ [Online]. Available: <http://www.foto-kurs.com/>. [Zugriff am 09 11 2015].
- [11] P. Armbrüster, Digitale Bildverarbeitung mit MATLAB, Rheinische Fachhochschule Köln, 2011.
- [12] R. Gardon, „An Instrument for Direct Measurement of Intense Thermal Radiation,“ *The Review of Scientific Instruments (Volume 24, Number 5)*, pp. 366-370, Mai 1953.
- [13] J. M. Kendall, Sr. und C. M. Berdahl, „Two Blackbody Radiometers of High Accuracy (Vol. 9, No. 5),“ *Applied Optics*, pp. 1082-1091, Mai 1970.
- [14] U. Groer und A. Neumann, „Development and testing of a high flux calorimeter at DLR Cologne,“ *Journal de Physique IV (STCT 9)*, pp. 643-648, 1999.
- [15] Basler AG, „Basler - The Power of Sight,“ [Online]. Available: [www.baslerweb.com](http://www.baslerweb.com). [Zugriff am 10 12 2015].
- [16] T. Causemann, „<http://freggelweb.de/>,“ [Online]. [Zugriff am 03 08 2015].
- [17] G. Heising, Skript zur Vorlesung Digitale Videotechnik - Bildverarbeitung 2, TFH Berlin, 2002.
- [18] R. C. Hibbeler, Technische Mechanik 1 - Statik, München: Pearson Education Deutschland GmbH, 2005.

- [19] G. Dibowski, Betriebshandbuch Hochleistungsstrahler, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., 2011.
- [20] A. Mantsch, Optische Qualitätskontrolle mittels LabVIEW & IMAQ, Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller AG & Co. KG, 2008.
- [21] T. Klinger, Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2003.
- [22] M. Thelen, Entwicklung eines Schwenkantriebes zur automatischen Zielpunktausrichtung eines Hochleistungsstrahlers, DLR / RFH, Forschungsprojektarbeit SS 2015.
- [23] M. Schiele, Konstruktion eines Filterrades für die Video-Meßkamera zur Flußdichtebestimmung am Sonnenofen der DLR Köln, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Diplomarbeit 1995.
- [24] K. Kraus, Photogrammetrie - Band 1, Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag, 1997.
- [25] A. Vratislavsky, „Geometrische Transformationen,“ 1998. [Online]. Available: <http://userpage.fu-berlin.de/~vratidla/Bildverarbeitung/GeoTrans/GeoTrans.html#3.2>. [Zugriff am 08 10 2015].
- [26] R. Weber, Webers Taschenlexikon Erneuerbare Energien, Vaduz (Liechtenstein): Olythus Verlag für Wissenschaft und Technik, 1995.
- [27] Deutsche Gesellschaft CLUB OF ROME e. V., Der DESERTEC-ATLAS, Hamburg: CEP Europäische Verlagsanstalt GmbH, 2011.
- [28] C. Chandler. [Online]. Available: [www.qdl.scs-inc.us](http://www.qdl.scs-inc.us). [Zugriff am 19 11 2015].

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Dies gilt auch für Quellen aus eigenen Arbeiten.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit oder nicht zitierte Teile daraus vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe.

Mir ist bekannt, dass meine Arbeit zum Zwecke eines Plagiatsabgleichs mittels einer Plagiatserkennungssoftware auf ungekennzeichnete Übernahme von fremdem geistigem Eigentum überprüft werden kann.

Ich versichere, dass die elektronische Form meiner Arbeit mit der gedruckten Version identisch ist.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Lebenslauf

Name: Martin Thelen  
Geburtsjahr: 1985  
Aktueller Wohnsitz: Ernst-Moritz-Arndt-Straße 1, 51427 Bergisch Gladbach

07 / 1996 – 06 / 2005: **Schul Ausbildung**  
Kaiserin-Theophanu-Schule (Gymnasium)  
Köln  
Abschluss: Abitur

08 / 2005 – 01 / 2008: **Berufsausbildung**  
BPW Bergische Achsen KG  
Wiehl  
Abschluss: Industriemechaniker (IHK)

09 / 2006 – 07 / 2010: **Duales Studium**  
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg  
Sankt Augustin  
Studiengang Maschinenbau  
Studienrichtung Mechatronik  
Abschluss: Diplom-Ingenieur (FH)

**Berufliche Stationen**  
BPW Bergische Achsen KG  
Wiehl  
02 / 2008 – 07 / 2008: Industriemechaniker (Instandhaltung)  
07 / 2010 – 03 / 2011: Konstrukteur (Nfz-Bremsen)  
04 / 2011 – 07 / 2014: Versuchingenieur (Nfz-Bremsen)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Köln  
08 / 2014 – heute: Versuchingenieur (Institut für Solarforschung)

08 / 2013 – heute: **Berufsbegleitendes Studium**  
Rheinische Fachhochschule Köln  
Köln  
Studiengang Master of Engineering  
Studienrichtung Automatisierungstechnik

---

Ort, Datum

---

Unterschrift